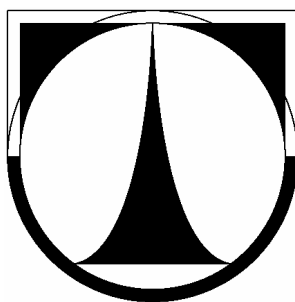


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**Fakulta strojní**



# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Technologie broušení rovinných ploch syntetických monokrystalů**

**2007**

**Varga Zdeněk**

# TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

## Fakulta strojní

Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti

**Studijní program: M2301 - strojní inženýrství**

Studijní obor: 3901T003 - Aplikovaná mechanika

Zaměření: Inženýrská mechanika

**Technologie broušení rovinných ploch syntetických monokrystalů**

**Technology of Surface Grinding of Synthetic Single Crystal**

Zdeněk Varga

číslo diplomové práce: KMP- 19 269

Vedoucí práce: Doc. Ing. Rudolf Vrzala, CSc.

Konzultant práce: Ing. Martina Řeháková

Počet stran:	83
Počet obrázků:	32
Počet grafů:	30
Počet tabulek:	4
Počet vzorců:	32
Počet příloh:	7

23. května 2007

## **Anotace**

Práce je detailně zaměřena na opracování rovinných ploch syntetických monokrystalů broušením. Mimo jiné bylo potvrzeno pomocí zmapování průběhu otáček tmelky, že pro volně pohybující se tmelku je proces broušení velice komplikovaný a dosti nereprodukovatelný. V kapitole věnující se úběru materiálu obrobku byla provedena studie, která se zabývá vlivem rychlosti a přítláčného tlaku při broušení na úběr materiálu broušeného krystalu.

Též bylo zhodnoceno, k čemu nejspíš dochází v samotném místě stykové plochy mezi obrobkem a brusným kotoučem, a to pomocí fotografie brusiva po broušení a byla vyslovena úvaha o drcení brusiva při broušení. V závěru práce byla navržena zpětná vazba formou syntézy vlivu trajektorie a relativní rychlosti tmelky vůči brusnému kotouči a byla vytvořena zpětná vazba na kontrolu rovinnosti brousícího kotouče.

## **Annotation**

This final work is intimately focused on machining of plane surface of synthetic single crystal by grinding. Among others it was confirmed by mapping of course of dop's revs that the process of grinding is too complicated and quite irreproducible for free moving dop. In chapter about substance removal of workpiece was made a study which is dedicated by influence of speed and thrust pressure to substance removal of grinding crystal during the grinding.

It was also evaluated by means of photo of abrasive material after the grinding what is rather happened right in the place of interface between the workpiece and abrasive disc and it was expressed a reflection about grind of abrasive material during the grinding. At the conclusion was proposed a feedback by synthesis of influence of trajectory and relative speed of dop towards abrasive disc and feedback was made for control of flatness of abrasive disc.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo a § 35 – o výdělečném užití díla k vnitřní potřebě školy.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé práce a prohlašuji, že souhlasím s případným užitím mé práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Místo: Liberec

Datum: 10.května 2007

Podpis: .....

Je mi potěšením tímto poděkovat zejména vedoucímu mé diplomové práce panu Doc. Ing. Rudolfu Vrzalovi, CSc. za velmi kvalitní odborné vedení mé práce, poskytnutí hojnosti studijních materiálů a trpělivost. Paní Ing. Martině Řehákové děkuji za poskytnutý čas a pomoc při prováděných experimentech.

Dále bych chtěl poděkovat kolegovi Vladislavu Chechelevovi z Fakulty Mechatroniky TUL za cennou pomoc při tvorbě měřicího zařízení otáček a rodičům za shovívavost a podporu. Bez této pomoci bych svoji diplomovou nedokončil.

A v neposlední řadě bych velmi rád poděkoval firmě CRYTUR, spol. s r.o. v Turnově, která mi umožnila celou diplomovou práci napsat s užitím jejich technologií.

## Obsah

<b>Anotace .....</b>	<b>4</b>
<b>Annotation .....</b>	<b>4</b>
<b>Obsah .....</b>	<b>7</b>
<b>Seznam grafů .....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam obrázků .....</b>	<b>11</b>
<b>Seznam tabulek .....</b>	<b>13</b>
<b>Seznam použitých symbolů a veličin .....</b>	<b>14</b>
<b>Seznam použitých zkratk .....</b>	<b>16</b>
<b>1 Úvod .....</b>	<b>17</b>
<b>2 Zpracování monokrystalických látek.....</b>	<b>19</b>
2.1 Polotovary.....	23
2.2 Technologie broušení .....	24
<b>3 Mechanismy brousících strojů .....</b>	<b>27</b>
<b>4 Pohyb tmelky po kotouči .....</b>	<b>30</b>
<b>5 Kinematika .....</b>	<b>34</b>
5.1 Pohyb bodu a tělesa .....	34
5.2 Čtyřkloubový mechanismus brousícího stroje s plynulou regulací otáček .....	36
5.3 Trajektorie středu tmelky $S_t$ v základním prostoru.....	39
5.4 Trajektorie obecného bodu tmelky v prostoru kotouče 2.....	41
5.5 Délka trajektorie obecného bodu tmelky v prostoru kotouče .....	49

5.6	Vliv změny úhlu nastavení kyvného unášivého ramene na délku trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče .....	51
5.7	Trajektorie obecného bodu kotouče v prostoru tmelky.....	54
5.8	Relativní rychlost obecného bodu tmelky na kotouči .....	57
<b>6</b>	<b>Měření otáček tmelky při zapnutém kyvu .....</b>	<b>59</b>
<b>7</b>	<b>Měření úběru materiálu .....</b>	<b>63</b>
<b>8</b>	<b>Návrh zpětné vazby.....</b>	<b>68</b>
<b>9</b>	<b>Závěr .....</b>	<b>79</b>
<b>10</b>	<b>Seznam použité literatury .....</b>	<b>81</b>
<b>11</b>	<b>Seznam příloh.....</b>	<b>83</b>

## Seznam grafů

Graf 1 - Poloha středu tmelky vzhledem k rámu .....	40
Graf 2 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu $\beta$ .....	52
Graf 3 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu $\beta$ (pět otáček) .....	52
Graf 4 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu $\beta$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ .....	53
Graf 5 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu $\beta$ (pět otáček), záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ .....	53
Graf 6 - Průběh velikosti vektoru $\vec{r}_{K3}$ v čase .....	56
Graf 7 - Průběh velikosti relativní rychlosti, záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ .....	58
Graf 8 - Závislost jednotlivých časů přerušení $t_p$ v čase $t$ .....	60
Graf 9 - Závislost otáček tmelky $n_{36}$ v čase $t$ .....	61
Graf 10 - Závislost časů přerušení $t_p$ v čase $t$ ( $n_{21} = 1,28 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , tři kyvy) .....	62
Graf 11 - Závislost odebraného materiálu na otáčkách kotouče pro křemen .....	64
Graf 12 - Závislost odebraného materiálu na otáčkách pro YAP .....	64
Graf 13 - Závislost odebraného materiálu na vzrůstajícím tlaku ( $n_{21} = 0,0547 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{41} = 0,9 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ) .....	65
Graf 14 - Závislost odebraného materiálu na vzrůstajícím tlaku ( $n_{21} = 0,805 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{41} = 0,9 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ) .....	66
Graf 15 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v počátku na intervalech ( $t = 90 \text{ s}$ , $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ) .....	69
Graf 16 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90 \text{ s}$ , $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v počátku) .....	69
Graf 17 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v $45^\circ$ na intervalech ( $t = 90 \text{ s}$ , $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ) .....	70
Graf 18 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90 \text{ s}$ , $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v $45^\circ$ ) .....	70



Graf 19 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v $135^\circ$ .....	71
Graf 20 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v $135^\circ$ ) .....	71
Graf 21 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v $225^\circ$ .....	72
Graf 22 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v $225^\circ$ ) .....	72
Graf 23 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v počátku .....	73
Graf 24 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,5 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v počátku) .....	74
Graf 25 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v $45^\circ$ .....	74
Graf 26 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,5 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v $45^\circ$ ) .....	75
Graf 27 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v $135^\circ$ .....	75
Graf 28 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,5 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v $135^\circ$ ) .....	76
Graf 29 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v $225^\circ$ .....	76
Graf 30 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,5 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ , přímka v $225^\circ$ ) .....	77

## Seznam obrázků

Obr. 1 - Povrch opracovaného YAPu (vlevo) karbidem boru (vpravo) o zrnitosti 600 a 1000.....	21
Obr. 2 - Fotografie z měření drsnosti povrchu YAPu po vyleštění.....	22
Obr. 3 - Rozmístění obrobků na tmelce bez a s příložkami .....	23
Obr. 4 - Detailní pohled na stykovou plochu kotouče .....	25
Obr. 5 - Brousící stroj s plynulou regulací otáček (vpravo je znázorněno umístění tmelek a jejich pohybu) .....	26
Obr. 6 - Jednoexcentrický stroj .....	27
Obr. 7 - Dvouexcentrický stroj .....	27
Obr. 8 - Mechanismus s kývavým pohybem .....	28
Obr. 9 - Znázornění klínovitosti u obrobku .....	30
Obr. 10 - Znázornění srovnání klínovitosti obrobku broušením .....	30
Obr. 11 - Pohyb tělesa v základním prostoru .....	34
Obr. 12 - Kinematické schéma čtyřkloubového mechanismu .....	36
Obr. 13 - Schéma pro určení závislostí $\vartheta(\varphi)$ a $\psi(\varphi)$ .....	37
Obr. 14 - Určení polohy středu tmelky .....	39
Obr. 15 - Schéma rozboru pohybu obecného bodu tmelky po kotouči .....	41
Obr. 16 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči .....	44
Obr. 17 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách .....	44
Obr. 18 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči .....	45
Obr. 19 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách .....	45
Obr. 20 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách ( $t = 90 \text{ s}$ , $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ).....	46
Obr. 21 - Trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách ( $t = 90 \text{ s}$ , $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,5 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ).....	47

Obr. 22 - Vliv změny umístění obrobků na rozložení trajektorií relativního pohybu bodů B tmelky vzhledem k brusnému kotouči (vlevo na poloměru 44 mm vpravo na poloměru 54 mm, $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ).....	48
Obr. 23 - Vliv změny umístění obrobků na rozložení trajektorií relativního pohybu bodů B tmelky vzhledem k brusnému kotouči (vlevo na poloměru 44 mm vpravo na poloměru 34 mm, $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ).....	48
Obr. 24 - Trajektorie relativního pohybu bodů B tmelky vzhledem k brusnému kotouči .....	49
Obr. 25 - Schéma rozboru pohybu obecného bodu kotouče po povrchu tmelky .....	54
Obr. 26 - Trajektorie obecných bodů kotouče K po povrchu tmelky .....	56
Obr. 27 - Schéma obvodu měření otáček $n_{31}$ .....	59
Obr. 28 - Schéma měřicího obvodu otáček $n_{36}$ .....	60
Obr. 29 – Brusivo před(vlevo) a po použití(vpravo) B4C - 1000 .....	67
Obr. 30 - Trajektorie relativního pohybu bodů B tmelky vzhledem k brusnému kotouči ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ) .....	68
Obr. 31 - Trajektorie relativního pohybu bodů B tmelky vzhledem k brusnému kotouči ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,5 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ) .....	73
Obr. 32 - Vliv změny umístění obrobků na rozložení trajektorií relativního pohybu bodů B tmelky vzhledem k brusnému kotouči ( $t = 90$ s, $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $n_{31} = 0,5 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , $x_{3B} = 54$ mm, záporná orientace $\kappa(t)$ , $\tau(t)$ ) .....	77

## Seznam tabulek

Tab. 1 - Dosahované povrchové drsnosti při opracování YAPu .....	20
Tab. 2 - Složení tmelů .....	24
Tab. 3 - Naměřené otáčky tmelky - .....	33
Tab. 4 - Měření jedním přerušením (kyv byl zapnut).....	59

## Seznam použitých symbolů a veličin

označení	význam	jednotka
$a, b$	empiricky zjištěné koeficienty	[-]
$b, c, d, k, l, r$	symbolické označení rozměrů brousícího stroje	[mm]
$e$	vzdálenost os kotouče a tmelky	[m]
$n_{21}$	otáčky kotouče	[s <sup>-1</sup> ]
$n_{31}$	otáčky tmelky	[s <sup>-1</sup> ]
$p$	tlak	[Pa]
$t$	čas	[s]
$t_p$	čas mezi přerušeními	[s]
$v$	rychlost	[m·s <sup>-1</sup> ]
$v_{32}$	relativní rychlost obecného bodu tmelky vůči kotouči	[m·s <sup>-1</sup> ]
$x_B^3$	x-ová souřadnice bodu B na tmelce	[mm]
$y_B^3$	y-ová souřadnice bodu B na tmelce	[mm]
$x_K$	x-ová souřadnice bodu K na kotouči	[mm]
$y_K$	y-ová souřadnice bodu K na kotouči	[mm]
$K_B$	součinitel charakterizující brusivo	[-]
$K_K$	součinitel charakterizující materiál kotouče	[-]
$K_1, \dots, K_4$	body na kotouči	[-]
$B$	bod na tmelce	[-]
$B_4C$	karbid bóru	[-]
$O_1, \dots, O_6$	počátky souřadnicových systémů	[-]
$R_2$	poloměr kotouče	[m]
$R_3$	poloměr tmelky	[m]
$R_O$	poloměr obrobku	[m]
$S_k$	střed kotouče	[-]
$S_t$	střed tmelky	[-]
$\beta$	úhel nastavení kyvného ramene	[°]
$\phi$	úhel natočení členu „4“	[rad]
$\kappa$	úhel natočení kotouče	[rad]
$\mu$	převodový poměr mezi kotoučem a tmelkou	[-]
$\tau$	úhel natočení tmelky	[rad]

$\omega_{21}$	úhlová rychlost kotouče	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
$\omega_{31}$	úhlová rychlost tmelky	$[\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}]$
1	rám stroje	$[-]$
2	kotouč - brousicí nástroj	$[-]$
3	tmelka - přípravek s obrobky	$[-]$
4, 5, 6, 7, 8	členy mechanismů	$[-]$
%	procento	$[-]$

## Seznam použitých zkratk

č.	číslo
Ing.	Inženýr
Obr.	Obrázek
spol. s r.o.	společnost s ručením omezeným
str.	strana
Tab.	Tabulka
tj.	to jest
tzv.	tak zvané
USB	Universal Serial Bus
YAP	Yttrium aluminium peroskit
YAG	Yttrium aluminium granát

# 1 Úvod

Pro nástup nových výrobních postupů je nutno stále více prohlubovat znalosti o dané problematice výroby, to může znamenat, že musí být použity prostředky pro vizualizaci výsledků, či průběhu daného děje. K těmto potřebám vizualizace již mnoho let slouží zařízení využívající vlastností monokrystalických látek, a to především jejich optických vlastností. Aby tyto vlastnosti mohly být využívány, musí být monokrystal opracován do příslušného tvaru. Nejrozličnějšími způsoby opracování jsou tyto látky přiváděny do nejrozličnějších tvarů tak, aby nejlépe posloužili danému účelu.

Jednou z metod opracování je broušení. Broušení obrobků lze rozdělit do mnoha kategorií, a to dle opracovávané plochy, nebo dosahovaného stavu broušeného povrchu. Aby měřicí zařízení pracovala s požadovanou přesností, musí být povrch opracovaného krystalu co možná nejdokonalejší. Požadavky na rovinnost čelních ploch jsou velice přísné a jejich dosažení je komplikované jako výroba sama. Při broušení těchto čelních ploch jsou používány brousící stroje k tomuto účelu speciálně upravené.

Tato práce se zabývá problematikou dosahování rovinnosti obrobků na jednom takovém brousícím stroji. Práce rozebírá vliv trajektorií a relativní rychlosti na rovinnost brusného kotouče stroje a tudíž i obrobku. Touto problematikou se ve své diplomové práci již zabýval na Katedře mechaniky, pružnosti a pevnosti Ing. Tomáš Novák.. Dále se touto problematikou také zabýval ve své práci i Ing. Antonín Baudyš, CSc.

Diplomová práce Ing. Tomáše Nováka vycházela z předpokladu, který byl definován Ing. Baudyšem, CSc. v jeho práci nazvané: “Kinematika strojů pro broušení a leštění rovinných optických ploch“. Tento předpoklad říká, že pro vyhodnocování opotřebení kotouče je používána výhradně relativní rychlost a ostatní vlivy, jako například vliv trajektorií nebo vliv přítlaku na rozpad brusiva, nejsou brány jako dominantní.

V práci Ing. Tomáše Nováka byl též řešen vliv rotace tmelky na opotřebení kotouče, vliv rychlosti středu tmelky na celkovou průměrnou rychlost  $v_p$ , opotřebení kotouče od tmelky se stojícím středem a vliv vzdáleností os tmelky a kotouče.



Částí mé práce bylo seznámit se s postupy formulovanými v diplomové práci Ing. Tomáše Nováka a posoudit dosažené cíle jeho práce a pomocí odlišného pohledu na problematiku tyto postupy přehodnotit s užitím alternativních přístupů k řešení této problematiky tak, aby mohl být proveden návrh nové, jiné zpětné vazby výroby na rovinnost brusného kotouče a tudíž i výrobků.

## 2 Zpracování monokrystalických látek

Krystal je periodické prostředí a informace o vnitřní stavbě krystalu je nesena geometrií a rozložením hmoty uvnitř buňky. Vlastnosti krystalů jsou především určeny povahou chemických prvků a jejich krystalografickou strukturou. Tyto materiály svými mechanickými, teplotními, optickými, elektrickými a magnetickými vlastnostmi umožňují pestré využití. Vhodným mechanickým opracováním lze těchto materiálů využít k výrobě scintilátorů a laserových tyčí.

K této výrobě slouží krystalické látky, které jsou uměle pěstovány, a to ve dvou krocích. V prvním kroku dochází ke vzniku zárodku a v druhém k růstu krystalu. Tímto způsobem přípravy lze dosáhnout velice čisté látky. Chemická čistota podmiňuje dobré optické vlastnosti při difrakci světla. Jedny ze základních materiálů využívaných pro výrobu scintilátorů jsou Ytrium Aluminium Peroskit a Ytrium Aluminium Granát, dále označované jako YAP a YAG. Jedná se o materiály jejichž tvrdost lze vyjádřit pomocí Mohsovy stupnice číslem 8,6 pro YAP a 8,5 pro YAG, což je téměř rovno tvrdosti korundu.

V případě, že další operací bude příčné dělení, bude v prvním kroku výroby scintilátoru krystalu, jakožto polotovaru, zarovnáno čelo. Následně je v rentgenu určena orientace krystalové mřížky zmíněného polotovaru. Znalost této orientace je důležitá v případě potřeby přesně dopadajících paprsků po průchodu krystalickou látkou.

Zpracování krystalu probíhá ve čtyřech krocích:

- řezání,
- hrubé broušení,
- jemné broušení,
- leštění.

U všech operací je velice pečlivě sledován rozměr výrobku, rovinnost a stav povrchu. Při dělení materiálu nás zajímá přírůstek na následující operace a délková odchylka, která se pohybuje řádově v setinách milimetrů. Tento povrch vykazuje známku jistého reliéfu, způsobeného házením řezného kotouče, což lze přisoudit tvrdosti materiálu, tuhosti zmíněného kotouče a přesnosti nastavení.

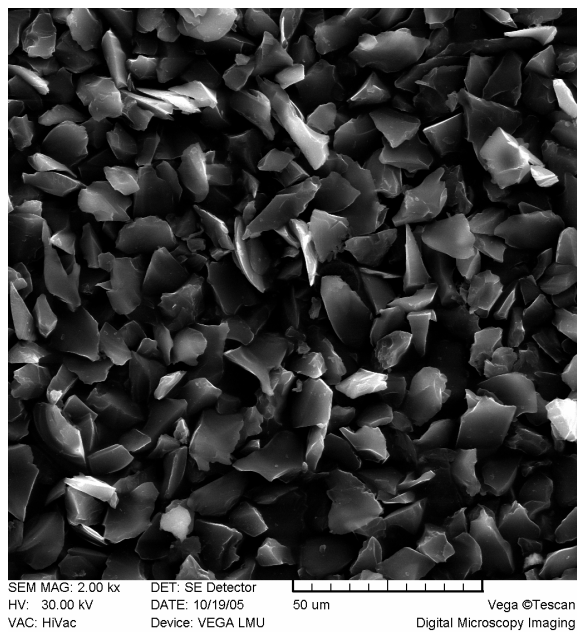
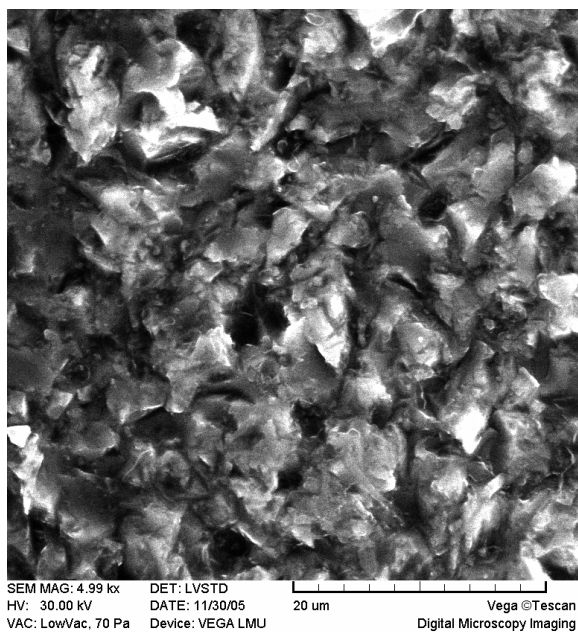
Stav povrchu obrobku je průběžně kontrolován, obzvláště při operacích broušení, a to zejména zda se na něm nevyskytují tzv. škráby či vlásečnice. Tyto dvě vady povrchu nejčastěji nastávají při odlišnosti velikosti zrn brusiva a nebo jejich tvaru. Jedná se o vrypy do povrchu, u kterých je nominální jejich rozměr kolmý k povrchu, který může zasáhnout až do oblasti přídatku na leštění, nebo může dojít k úplnému znehodnocení výrobku.

Povrch obrobku je v průběhu broušení kontrolován na průsvit pomocí nožového pravítka, čímž dostává pracovník informaci o stavu reliéfu. Smyslem velice komplikovaného procesu zpracování je dosažení výrobku s precizním povrchem. Tolerance broušené roviny obrobku je až  $\lambda/10$ , kde  $\lambda$  je vlnová délka světla<sup>1</sup>. Opracováním je snižována drsnost povrchu na hodnoty (Tab.1), které po vyleštění dají čirý, opticky nezávadný povrch. Přesto je u tohoto vyleštěného povrchu kontrolována drsnost měřením (Obr. 2). Na přiložených snímcích z elektronového mikroskopu jsou fotografie povrchu YAPu po broušení karbidem boru o „zrnitosti“ 600 a 1 000, dále jsou přiloženy fotografie samotného karbidu boru, též „zrnitosti“ 600 a 1 000 (Obr. 1).

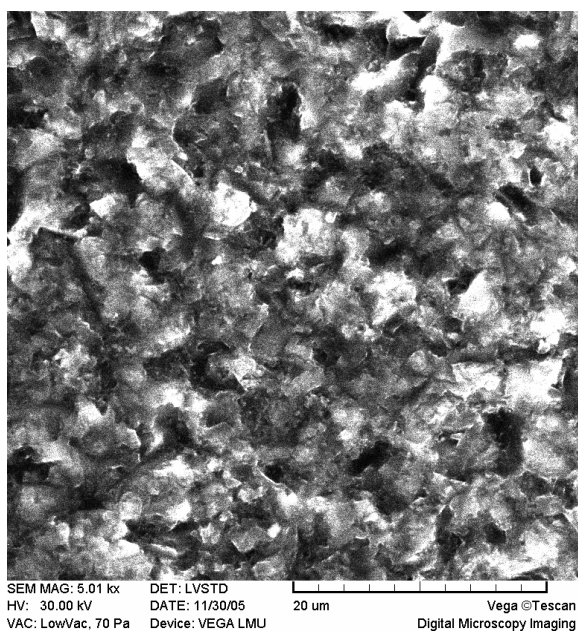
Operace zpracování	Průměrná povrchová drsnost Ra
Řezání	591,9 $\mu\text{m}$
Hrubé broušení B <sub>4</sub> C 600	253,7 $\pm$ 0,1 nm
Jemné broušení B <sub>4</sub> C 1 000	117,7 $\pm$ 0,1 nm
Leštění	0,597 nm

**Tab. 1 - Dosahované povrchové drsnosti při opracování YAPu**

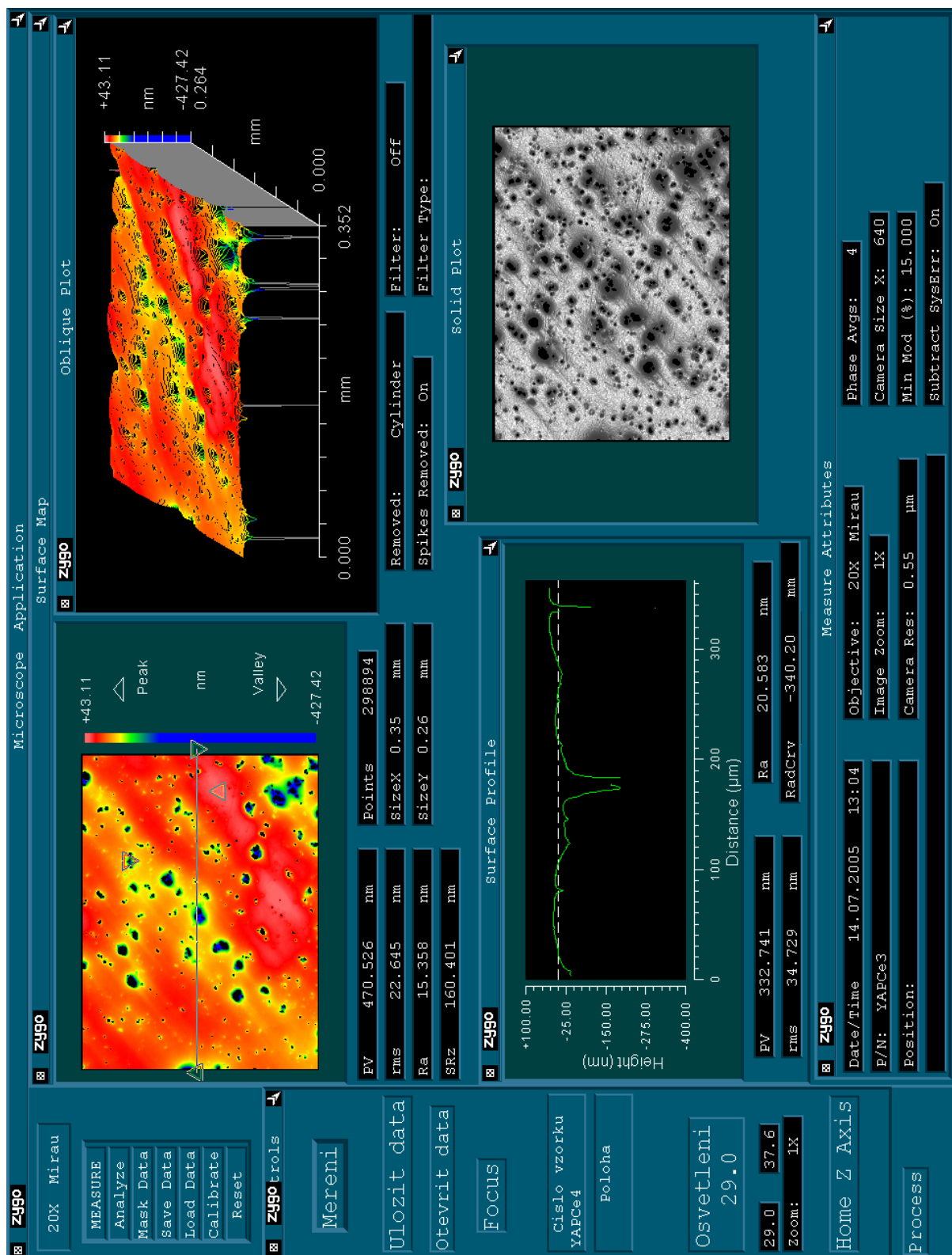
<sup>1</sup> Používá se světlo o vlnové délce  $\lambda=635$  nm - červené.



**Obr. 1a - Povrch opracovaného YAPu (vlevo) karbidem boru (vpravo) o „zrnitosti“ 600**



**Obr. 1b - Povrch opracovaného YAPu (vlevo) karbidem boru (vpravo) o „zrnitosti“ 1000**



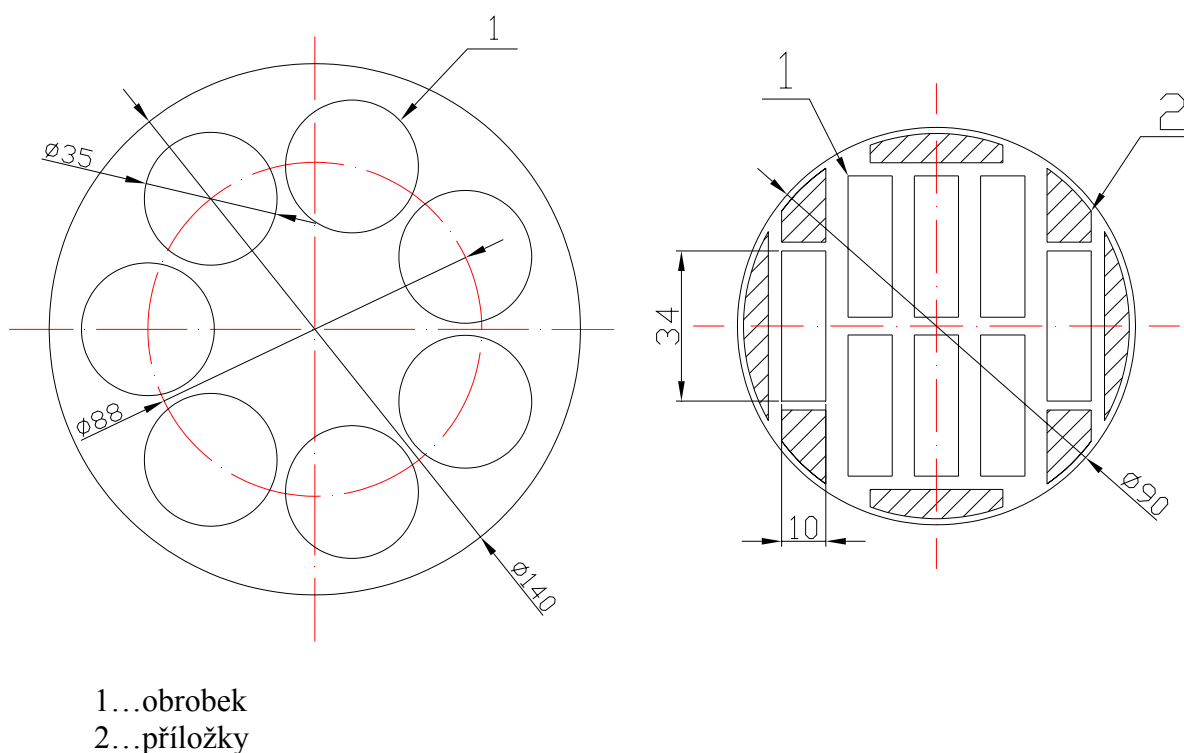
Obr. 2 - Fotografie z měření drsnosti povrchu YAPu po vyleštění

## 2.1 Polotovary

Polotovary je možné rozdělit podle:

- velikosti,
- materiálu.

Velikost, materiál a také i počet polotovarů výrobku je pro další opracování velice důležitá informace především pro volbu vhodné technologie broušení a brousícího stroje a tím i velikost tmelky. V případě výroby malých scintilátorů (určující je zde velikost stykových ploch) se musí použít takzvané příložky (Obr. 3), aby nedošlo ke smetení<sup>2</sup> hran výrobků. Tyto příložky jsou z materiálu stejné tvrdosti jako je obrobek. Pro případ broušení na jednoexcentrickém stroji s průměrem tmelky 140 mm je používáno polotovarů o průměrech 15 až 55 mm z materiálu YAP nebo YAG.



Obr. 3 - Rozmístění obrobků na tmelce bez a s příložkami

<sup>2</sup> Termín byl převzat z výrobního prostředí firmy CRYTUR, spol s r.o. v Turnově.

## 2.2 Technologie broušení

Pro natmelení je používáno měkkých, či tvrdých tmelů, a to dle tvrdosti polotovaru. Natmelení je proces, při kterém pracovník zahřeje tmelku, nanese tmel a přiloží obrobky. Obrobky poté přimačkává do tmelu tak, aby byly natmeleny paralelně s tmelkou co možná nejvíce v jedné rovině.

Tmel	Poměr včelí vosk / kalafuna
měkký	1:2
tvrdý	1:3

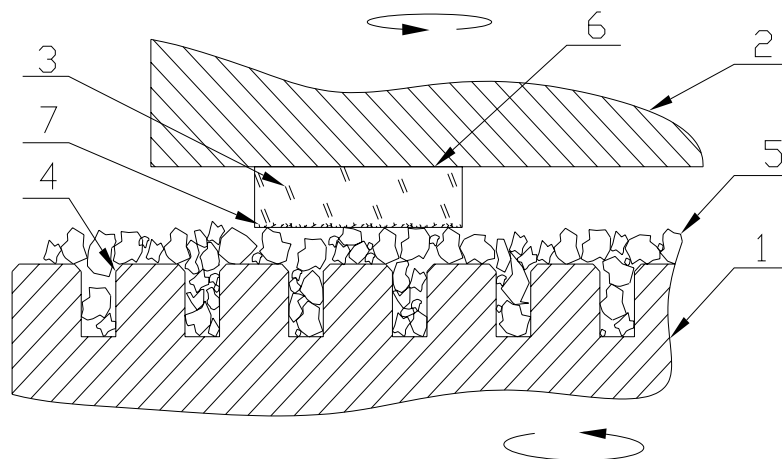
**Tab. 2 - Složení tmelů**

Pracovník provede orovnění na brousícím stroji, dále provede vyleštění a odtmelení polotovarů zahřátím tmelky. Následuje precizní očištění tmelky od starého tmelu a nanesení tmelu, na který je přiložen cigaretový papír, který je také poté pokryt tmelem. Tento papír má zabránit poškrábání již vyleštěných ploch. Celá součást je proměřena a přitmelena k tmelce pro opracování na daný rozměr s přídavkem na leštění. Tento krok natmelení je velice důležitý s ohledem na konečnou jakost výrobku. Jak na požadavek rovinnosti broušených ploch, tak na vznik klínů nebo odbroušení klínu na obrobku.

Broušení monokrystalických a skleněných látek je prováděno na rovinném kotouči, jakožto nástroji, který je nasazen na vertikální hřídel a obrobek je k rotujícímu nástroji přitlačován shora. Obrobky jsou natmeleny na tmelku, která je hnaná buď rameny stroje nebo má na své svrchní straně středovou prohlubeň, do které zapadá kulový čep hnacího mechanismu, pomocí něhož vykonává kývavý pohyb.

Brusný kotouč je opatřen drážkami, viz Obr. 4, které slouží k:

- otáčení jednotlivých zrn brusiva,
- přívodu brusiva,
- chlazení.



1 brusný kotouč, 2 tmelka, 3 obrobek, 4 drážky, 5 brusivo, 6 tmel, 7 broušená oblast

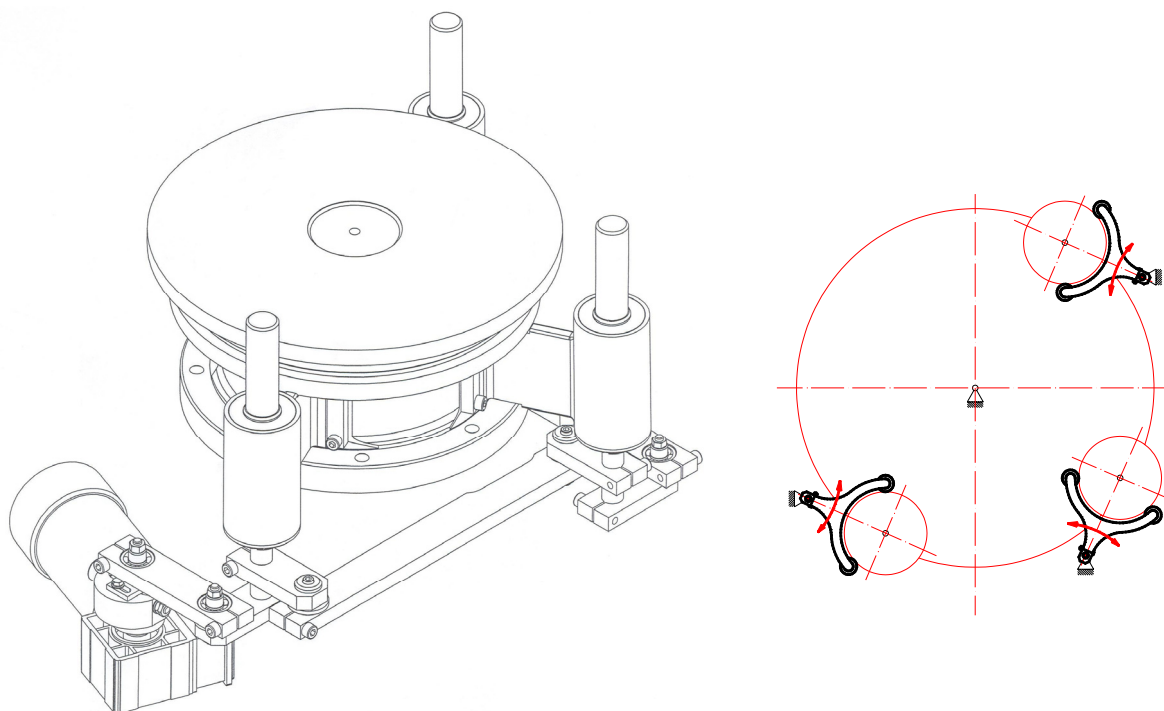
**Obr. 4 - Detailní pohled na stykovou plochu kotouče**

Stroje, které k této výrobě používá firma CRYTUR, spol. s r.o. v Turnově, jsou z kinematického hlediska dva, a to buď jednoexcentrický nebo dvojexcentrický mechanismus. U jednoexcentrického stroje s plynulou regulací otáček brusného kotouče a kyvného ramene jsou tři poháněné hřídele, které zajišťují kývavý pohyb ramen. Tato kyvná ramena unášejí tmelku po povrchu kotouče a tmelka se samovolně otáčí kolem vlastního středu pomocí stykových třecích sil. V dalším textu bude součinitel tření mezi dvěma stykovými plochami nazýván jako tzv. **Odpor proti broušení**.

Dvě hřídele jednoexcentrického stroje s regulací otáček (Obr. 5) nesou obrobky a třetí unáší litinový kotouč po povrchu. Pomocí tohoto litinového protikusu dostává obsluha stroje informaci o momentálním opotřebení kotouče.

Vzhledem k tomu, že tento litinový portikus vykonává také kývavý pohyb, je informace o stavu povrchu značně zkreslená, proto obsluha musí přibližně po půlhodině očistit brousící kotouč od brusiva a demineralizované vody. Poté překontroluje brousící kotouč na průsvit nožovým pravítkem a sférometrem litinový protikus. V případě, že obsluha zjistí při odečtení z displeje sférometru, který používá k zjištění „negativního“ profilu brusného kotouče, hodnotu odchylky od rovinného kotouče větší než 0,005 mm, tak musí provést orovnění. Orovňávání se provádí speciálně upravenou tmelkou s diamantovými břitzy.



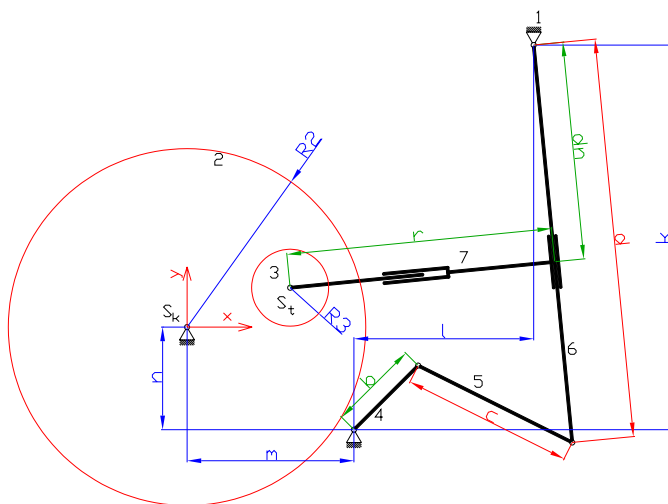


**Obr. 5 - Brousící stroj s plynulou regulací otáček (vpravo je znázorněno umístění tmelek a jejich pohybu)**

Celková rovinnost výrobku je tedy závislá na natmelení a na rovnoměrnosti opotřebení litinového kotouče. Při kývavém pohybu ramen je zapotřebí, aby tmelka přejížděla přes okraj kotouče a tím aby docházelo k rovnoměrnějšímu opotřebení.

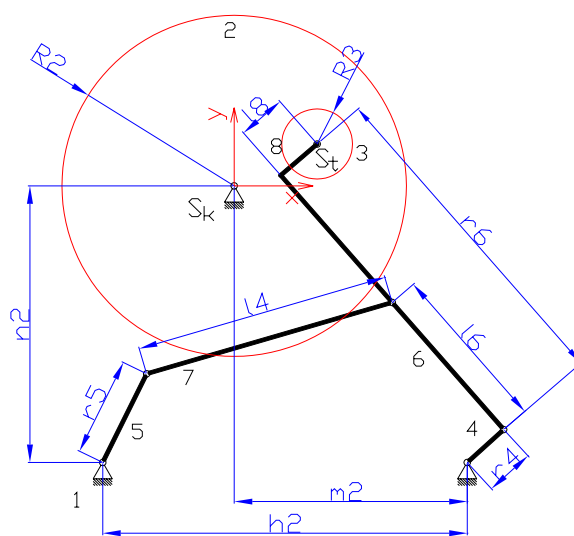
### 3 Mechanismy brousících strojů

V minulosti byl pohyb realizován jednoexcentrickým (Obr. 6) nebo dvojexcentrickým (Obr. 7) mechanismem. V současnosti je především využíván stroj s čtyřkloubovým mechanismem (Obr. 8) s plynulou regulací otáček kotouče a kyvného ramene. Mechanismus čtyřkloubového stroje s regulací vyvoluje kývavý pohyb, přičemž tmelka samovolně rotuje kolem své osy.



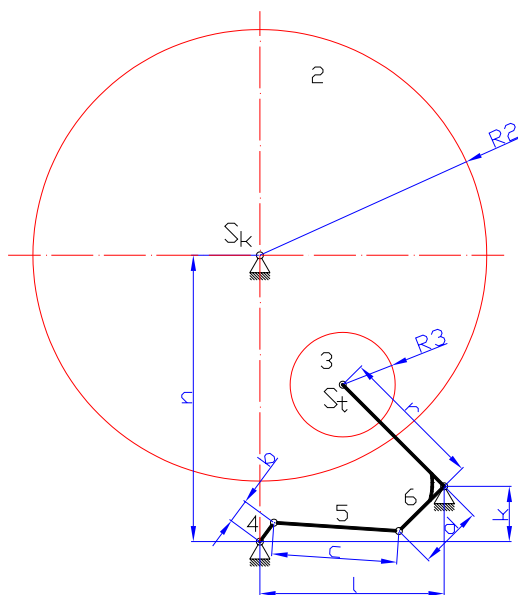
Obr. 6 - Jednoexcentrický stroj

Jelikož tmelka není nuceně hnána po povrchu kotouče stejnou obvodovou rychlostí jako je hnán kotouč, tak dochází k prokluzu mezi kotoučem a tmelkou. Prokluz byl vyjádřen jako převodový poměr  $\mu$  otáček kotouče k otáčkám tmelky.



Obr. 7 - Dvouexcentrický stroj

Rotace tmelky je vyvozena vzájemným relativním pohybem při působení odporu proti broušení. Přítlak vytváří pouze vlastní tíže tmelky, což je přibližně 2,7 kg.



**Obr. 8 - Mechanismus s kývavým pohybem**

V této práci bude nadále rozvinuta problematika týkající se pouze stroje s čtyřkloubovým mechanismem s plynulou regulací otáček.

Při porovnání jednoexcentrického a dvouexcentrického stroje bylo využito závěrů z diplomové práce [6], z kterých lze usuzovat, že u jednoexcentrického stroje bude docházet k rovnoměrnějšímu rozložení opotřebení brusného kotouče. Diplomová práce [6] vyšla z práce Antonína Baudyš [1], respektive bylo využito tvrzení:

Protože plocha úběru v jednotlivých bodech je úměrná průměrným relativním rychlostem v příslušných bodech, snažíme se z hlediska kinematiky dosáhnout nastavení jednotlivých kinematických proměnných, aby rychlostní pole a tedy i plocha úběrů se ve všech bodech co nejvíce přimykaly k žádané ideální rovině.

Nutno mít ale na paměti, že výsledná plocha nemusí pro to či ono nastavení odpovídat zcela úběrům zjištěným experimentálně, neboť tento úběr není závislý pouze na rozložení relativní rychlosti, a dále, že jsme předpokládali neustálý úběr ve všech bodech po celou dobu

brousícího procesu, a také úběr přes stále stejnou úměru  $/t_j$  stejný převod mezi relativní rychlostí a úběrem/.<sup>3</sup>

Pro posouzení dalších vlivů na opotřebení brusného kotouče byl v této práci proveden rozbor trajektorií relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči.

---

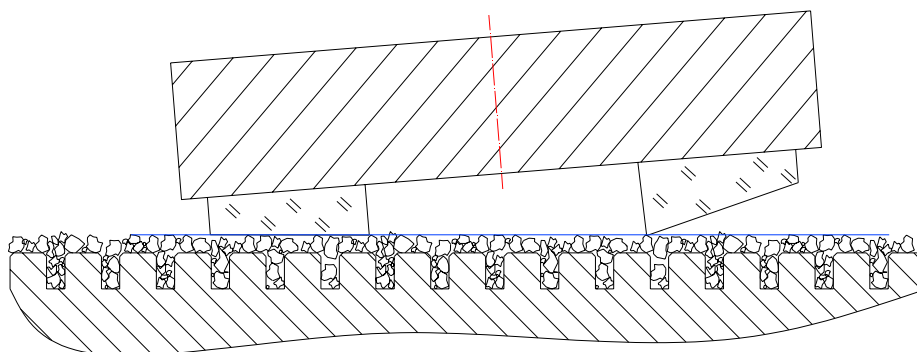
<sup>3</sup> Baudyš, A. Kinematika strojů pro broušení a leštění rovinných optických ploch. Praha: České vysoké učení technické, 1980 str. 20-21

## 4 Pohyb tmelky po kotouči

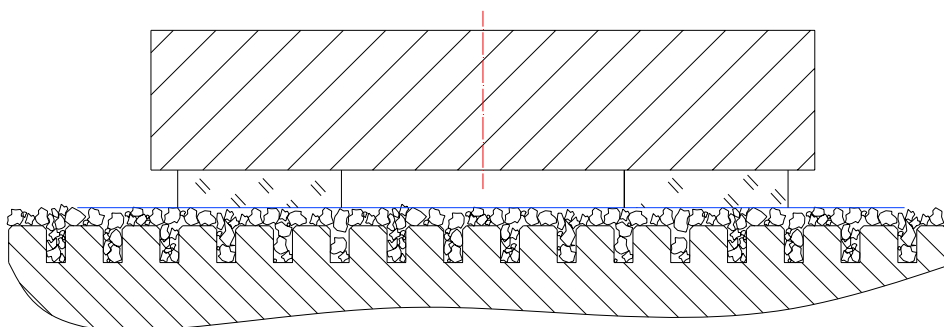
Tmelka je po povrchu kotouče unášena pomocí ramen obráběcího stroje. Přičemž vykonává zmiňovaný rotační pohyb okolo vlastní osy. Tento rotační pohyb je do jisté míry jednou z našich největších neznámých, respektive všechny jeho dílčí složky. Na tento pohyb mají největší vliv následující faktory:

- klínovitost jednotlivých obrobků před broušením,
- přítlak tmelky na brusný kotouč,
- poměr brusiva ve vodě,
- homogenita krystalu.

Brusivo je na povrch kotouče přiváděno pomocí dávkovače, který společně s kývavým pohybem tmelky zajišťuje rovnoměrné pokrytí kotouče karbidem boru v demineralizované vodě. V případě, že brusivo není rozpuštěno ve vhodném poměru, může dojít k zastavení pohybu tmelky. V převážné většině případů je zřejmě příčinou ukončení rotace nedostatek zrn brusiva v místě styku obrobku s kotoučem.



**Obr. 9 - Znázornění klínovitosti u obrobku**



**Obr. 10 - Znázornění srovnání klínovitosti obrobku broušením**

V případě klínovitosti jednotlivých obrobků před jejich broušením (Obr. 9) vzniká z těchto obrobků obecná styková rovina (**modře vyznačena**). Do této roviny často zasahuje jenom nepatrná část obrobku, která převyšuje zbylou část krystalu, která je dána požadovaným rozměrem. Styková plocha je potom omezena zprvu na tyto vyvýšeniny. Pohyb tmelky je nerovnoměrný do okamžiku kdy se tyto vrcholky neodbrousí (Obr. 10).

V průběhu broušení se též projeví nehomogenita krystalu, tento nehomogenní krystal je natmelen společně s ostatními na tmelku (Obr. 3 vlevo). Jeho nehomogenita způsobí odolnost proti mechanickému opotřebení. Tento krystal se proto obrábí velice pomalu a krystaly brusiva jeho povrch spíše leští než brousí. Tmelka na tomto krystalu takzvaně visí, pohyb tmelky je nerovnoměrný a dochází k znehodnocení ostatních krystalů z důvodu klínovitosti či překročení odebraného přídatku na broušení.

Pro zmapování prokluzu  $\mu$  tmelky vůči kotouči byly změřeny otáčky  $n_{31}$  při změně **excentricity**  $e$  a otáček brousícího kotouče, z kterých byla sestrojena Tab. 3. Ukázalo se, že prokluz  $\mu$  se pohybuje okolo 30% (vypočtené hodnoty prokluzu v % jsou uvedeny červeně v Tab. 3). Toto měření bylo provedeno s tmelkou o průměru 140 mm a natmelenými obrobky z materiálu YAP, tvar a rozmístění obrobků bylo dle Obr. 3. Při měření bylo vyzorováno, že při malých otáčkách kotouče (okolo  $0,64 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ) dochází k velice nerovnoměrné rotaci tmelky.

Při měření občas docházelo i k výraznému zpomalení během části otáčky tmelky. Tento pohyb je značně nereprodukovatelný a stěží měřitelný, proto v Tab. 3 došlo k tomu, že některá políčka zůstala prázdná z důvodu toho, že se tmelka zastavila. Ze sestrojené tabulky a vypočtených hodnot prokluzu se ukázalo, že při malé excentricitě a malých otáčkách kotouče je prokluz malý. Zvýšením otáček kotouče při téže excentricitě pak prokluz narůstá. Opačná anomálie se objevila u excentricity okolo 125 mm. Tuto anomálii by bylo možno potvrdit velkým množstvím měření za konstantních podmínek.

Ovšem je nutno podotknout, že proces je závislý na mnoha proměnných a při změně poměru brusiva ve vodě, změně tvaru obrobků nebo materiálu obrobků se dané hodnoty otáček  $n_{31}$  mohou výrazně změnit.

Pro výpočet trajektorií a relativní rychlosti (v této práci) bylo uvažováno nastavení, které je nejvíce k obrábění používáno (ve firmě CRYTUR, spol. s r.o. v Turnově), které je definováno otáčkami kotouče  $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$  a uvažovanými otáčkami tmelky  $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$  při předpokládaném konstantním prokluzu okolo 30%.

Excentricita $e$ [mm]	80	Prokluz [%]	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130	135	140												
Otáčky kotouče $n_{21}$ [ots <sup>-1</sup> ]																										
Otáčky tmelky $n_{31}$ [ots <sup>-1</sup> ]																										
0.64	0.58	9.4																								
0.75	0.69	8.0	25.3																							
0.85	0.78	8.2	29.4	0.52	38.8	0.56	34.1	0.55	35.3	0.54	36.5	0.56	34.1	0.53	37.7	0.59	30.1				0.62	27.0	0.58	31.8		
0.95	0.90	5.3	27.4	0.58	38.9	0.64	32.6	0.65	31.6	0.66	30.5	0.64	32.6	0.58	38.9	0.67	29.5				0.54	43.8	0.65	31.6	0.72	24.2
1.04	1.02	3.8	29.8	0.62	40.4	0.71	31.7	0.73	29.8	0.75	27.9	0.77	26.0	0.64	38.5	0.73	29.8	29.8	0.52	50.0	0.56	46.2	0.72	30.8	0.80	23.0
1.11	1.03	7.2	24.3	0.78	39.7	0.83	25.2	0.84	24.3	0.85	23.4	0.86	22.5	0.71	36.0	0.86	22.5	49.6	0.56	49.6	0.62	44.1	0.78	39.7	0.85	23.4
1.23	1.04	15.4	29.3	0.80	35.0	0.90	26.8	0.92	25.2	0.93	24.4	0.94	23.6	0.81	34.1	0.94	23.6	50.4	0.61	50.4	0.67	45.5	0.92	25.2	0.98	20.3
1.34	1.08	19.4	28.4	0.93	30.6	1.02	23.9	0.95	29.1	0.95	29.1	0.98	26.9	0.87	35.0	1.00	25.4	54.5	0.61	54.5	0.85	36.6	0.98	26.9	1.08	19.4
1.43	0.90	37.0	29.4	0.99	30.8	1.00	30.0	0.95	33.6	0.97	32.2	1.00	30.0	0.96	32.9	1.10	23.0	55.2	0.64	55.2	0.98	31.5	1.13	21.0	1.12	21.7
1.53	0.83	45.8	28.8	1.05	31.4	1.06	30.7	1.01	34.0	1.00	34.6	1.01	34.0	1.02	33.3	1.12	26.8	58.2	0.64	58.2	1.05	31.4	1.11	27.5	1.17	23.5
1.63	0.84	48.5	32.5	1.18	27.6	1.11	31.9	1.11	31.9	1.06	35.0	1.10	32.5	1.06	35.0	1.20	26.4	58.3	0.68	58.3	1.15	29.5	1.20	26.4	1.20	26.4
1.73	0.85	50.9	24.9	1.30	24.9	1.14	34.1	1.15	33.5	1.13	34.7	1.13	34.7	1.13	34.7	1.30	24.9	49.1	0.88	49.1	1.20	30.6	1.27	26.6	1.32	23.7
1.83	0.85	53.6	25.1	1.36	25.7	1.24	32.2	1.26	31.1	1.25	31.7	1.20	34.4	1.18	35.5	1.38	25.5	50.8	0.90	50.8	1.28	30.4	1.30	29.0	1.39	24.0
1.92	0.85	55.7	24.5	1.42	26.0	1.34	30.2	1.36	29.2	1.37	28.6	1.30	32.3	1.26	34.4	1.45	24.5	43.2	1.09	43.2	1.36	29.2	1.38	28.1	1.45	24.5

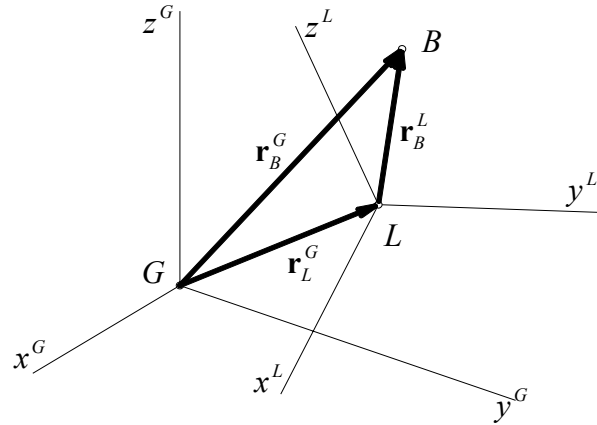
Tab. 3 – Naměřené otáčky tmelky



## 5 Kinematika

### 5.1 Pohyb bodu a tělesa

Sledujme pohyb tělesa, v němž byla zvolena souřadnicová soustava  $L, x^L, y^L, z^L$  v základním prostoru  $G, x^G, y^G, z^G$  (Obr. 11).



Obr. 11 - Pohyb tělesa v základním prostoru

Pohyb bodu B tělesa je popsán parametrickými rovnicemi

$$\begin{aligned} x_B^G &= x_B^L \cos \alpha_{x^L} + y_B^L \cos \alpha_{y^L} + z_B^L \cos \alpha_{z^L} + x_L^G, \\ y_B^G &= x_B^L \cos \beta_{x^L} + y_B^L \cos \beta_{y^L} + z_B^L \cos \beta_{z^L} + y_L^G, \\ z_B^G &= x_B^L \cos \gamma_{x^L} + y_B^L \cos \gamma_{y^L} + z_B^L \cos \gamma_{z^L} + z_L^G, \end{aligned} \quad (1)$$

kde

$x_B^G, y_B^G, z_B^G$  souřadnice bodu B v základním prostoru,

$x_B^L, y_B^L, z_B^L$  souřadnice téhož bodu v prostoru tělesa,

$\alpha_{x^L}, \beta_{x^L}, \gamma_{x^L}, (\alpha_{y^L}, \beta_{y^L}, \gamma_{y^L}, \alpha_{z^L}, \beta_{z^L}, \gamma_{z^L})$  směrové úhly osy  $x_B^L, (y_B^L, z_B^L)$ .

Soustavu (1) lze maticově zapsat

$$\begin{bmatrix} x_B^G \\ y_B^G \\ z_B^G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha_{x^L} & \cos \alpha_{y^L} & \cos \alpha_{z^L} \\ \cos \beta_{x^L} & \cos \beta_{y^L} & \cos \beta_{z^L} \\ \cos \gamma_{x^L} & \cos \gamma_{y^L} & \cos \gamma_{z^L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B^L \\ y_B^L \\ z_B^L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_L^G \\ y_L^G \\ z_L^G \end{bmatrix},$$

nebo symbolicky

$$\mathbf{r}_B^G = \mathbf{T}^{GL} \mathbf{r}_B^L + \mathbf{r}_L^G, \quad (2)$$

kde

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_B^G &= [x_B^G, y_B^G, z_B^G]^T && \text{průvodič bodu B v základním prostoru,} \\ \mathbf{r}_B^L &= [x_B^L, y_B^L, z_B^L]^T && \text{průvodič téhož bodu v prostoru tělesa,} \\ \mathbf{r}_L^G &= [x_L^G, y_L^G, z_L^G]^T && \text{průvodič počátku L v základním prostoru,} \\ \mathbf{T}^{GL} &&& \text{transformační matice.} \end{aligned}$$

Rovnice (2) je maticová rovnice pohybu bodu B. Matice  $\mathbf{r}_B^G$ ,  $\mathbf{T}^{GL}$  a  $\mathbf{r}_L^G$  jsou funkcemi času, vektor  $\mathbf{r}_B^L$  je stálý.<sup>4</sup> Toto vyjadřuje zápis:

$$\mathbf{r}_B^G(t) = \mathbf{T}^{GL}(t) \mathbf{r}_B^L + \mathbf{r}_L^G(t).$$

Vztahy pro rychlost bodu B odvodíme z rovnice (2). Derivujeme-li ji podle času, dostaneme, že

$$\mathbf{v}_B^G(t) = \dot{\mathbf{T}}^{GL}(t) \mathbf{r}_B^L + \dot{\mathbf{r}}_L^G(t),$$

kde

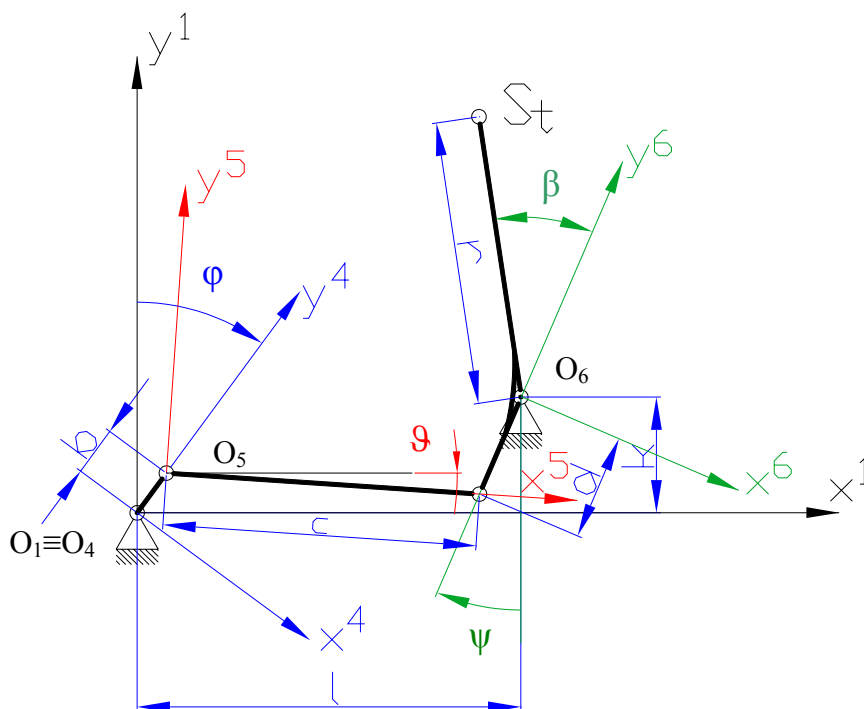
$$\begin{aligned} \mathbf{v}_B^G(t) &= \dot{\mathbf{r}}_B^G(t) && \text{vyjadřuje rychlost bodu B,} \\ \mathbf{v}_L^G &= \dot{\mathbf{r}}_L^G(t) && \text{rychlost počátku L.} \end{aligned}$$

---

<sup>4</sup> Brát, V. Jáč, V. Rosenberg, J. Kinematika. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987, str. 210

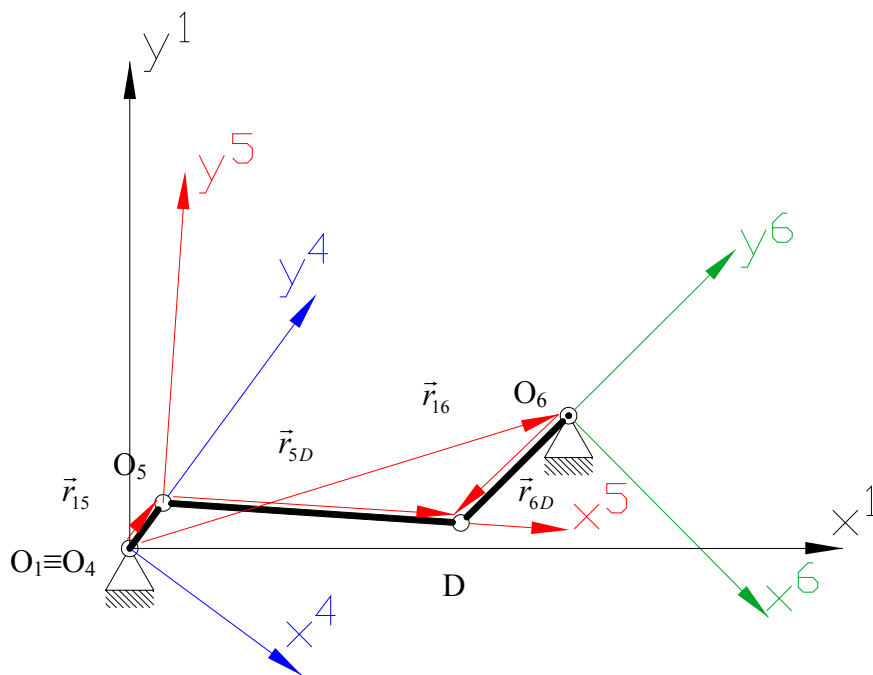
## 5.2 Čtyřkloubový mechanismus brousícího stroje s plynulou regulací otáček

U stroje s čtyřkloubovým mechanismem s plynulou regulací otáček brusného kotouče a kyvných ramen tmelky je náhon brusného kotouče oddělen od náhonu mechanismu. Tyto pohony jsou připojeny na frekvenční měnič, což umožňuje libovolné nastavení rychlosti kyvu a otáček brusného kotouče na dvou nezávislých panelech.



**Obr. 12 - Kinematické schéma čtyřkloubového mechanismu**

Odměření úhlu  $\beta$  bylo provedeno na schématickém výkresu, viz příloha č. 1. Tento úhel odpovídá odtržení tmelky od kyvného ramene v úvratí. Změřena byla vzdálenost středu rolničky od spojnice středu kotouče se středem kyvného ramene při odtržení a poté byl odměřen úhel beta.



Obr. 13 - Schéma pro určení závislostí  $\mathcal{A}(\varphi)$  a  $\psi(\varphi)$

Z (Obr. 13) bylo možno napsat vektorovou rovnici (3), která byla dále upravována pro stanovení převodových funkcí  $\mathcal{A}(\varphi)$  a  $\psi(\varphi)$ .

$$\vec{r}_{15} + \vec{r}_{5D} = \vec{r}_{16} + \vec{r}_{6D}, \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} b \sin \varphi \\ b \cos \varphi \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \vartheta & \sin \vartheta & 0 \\ -\sin \vartheta & \cos \vartheta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ k \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -d \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$b \sin \varphi + c \cos \vartheta = l - d \sin \psi,$$

$$b \cos \varphi - c \sin \vartheta = k - d \cos \psi, \quad (4)$$

Po úpravě

$$b^2 + d^2 + l^2 + k^2 - c^2 + 2bd \sin \varphi \sin \psi - 2bl \sin \varphi - 2dl \sin \psi + 2bd \cos \varphi \cos \psi - 2bk \cos \varphi - 2dk \cos \psi = 0, \quad (5)$$

Tuto rovnice byla převedena na úplnou rovnici trigonometrickou

$$(2bd\cos\varphi - 2dk)\cos\psi + (2bd\sin\varphi - 2dl)\sin\psi = c^2 - b^2 - d^2 - l^2 - k^2 + 2bl\sin\varphi + 2bk\cos\varphi,$$

Z které byla určena závislost  $\psi(\varphi)$

$$\psi(\varphi) = \arcsin \frac{c^2 - b^2 - d^2 - l^2 - k^2 + 2bl\sin\varphi + 2bk\cos\varphi}{\pm \sqrt{(2bd\cos\varphi - 2dk)^2 + (2bd\sin\varphi - 2dl)^2}} - \operatorname{arctg} \frac{2bd\cos\varphi - 2dk}{2bd\sin\varphi - 2dl}, \quad (6)$$

Pro určení  $\dot{\psi}$  byla derivována rovnice (5)

$$2bd(\cos\psi\dot{\psi}\sin\varphi + \cos\varphi\dot{\psi}\sin\psi) - 2dl\cos\psi\dot{\psi} - 2bd(\sin\psi\dot{\psi}\cos\varphi + \sin\varphi\dot{\psi}\cos\psi) + 2dk\sin\psi\dot{\psi} - 2bl\cos\varphi\dot{\psi} + 2bk\sin\varphi\dot{\psi} = 0,$$

$$\dot{\psi} = \frac{b[d(\cos\varphi\dot{\psi}\sin\psi - \sin\varphi\dot{\psi}\cos\psi) + (k\sin\varphi\dot{\psi} - l\cos\varphi\dot{\psi})]}{d[b(\sin\psi\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi) + (l\cos\psi - k\sin\psi)]},$$

Pro určení závislosti úhlu  $\vartheta(\varphi)$  byla upravena soustava rovnic (4)

$$\begin{aligned} c\cos\vartheta - (l - b\sin\varphi) &= -d\sin\psi \\ -c\sin\vartheta + (b\cos\varphi - k) &= -d\cos\psi \end{aligned} \quad (7)$$

Povýšením na druhou a sečtením byla určena následující rovnice

$$\begin{aligned} c^2 + l^2 + b^2 + k^2 - d^2 - 2cl\cos\vartheta + 2cb\cos\vartheta\sin\varphi - 2lb\sin\varphi - 2bk\cos\varphi - 2cb\sin\vartheta\cos\varphi + \\ + 2ck\sin\vartheta = 0, \end{aligned} \quad (8)$$

která byla převedena na trigonometrickou rovnici

$$(2cb\sin\varphi - 2cl)\cos\vartheta + (2ck - 2cb\cos\varphi)\sin\vartheta = d^2 - c^2 - l^2 - b^2 - k^2 + 2lb\sin\varphi + 2bk\cos\varphi.$$

Z které byla určena závislost  $\mathcal{A}(\varphi)$

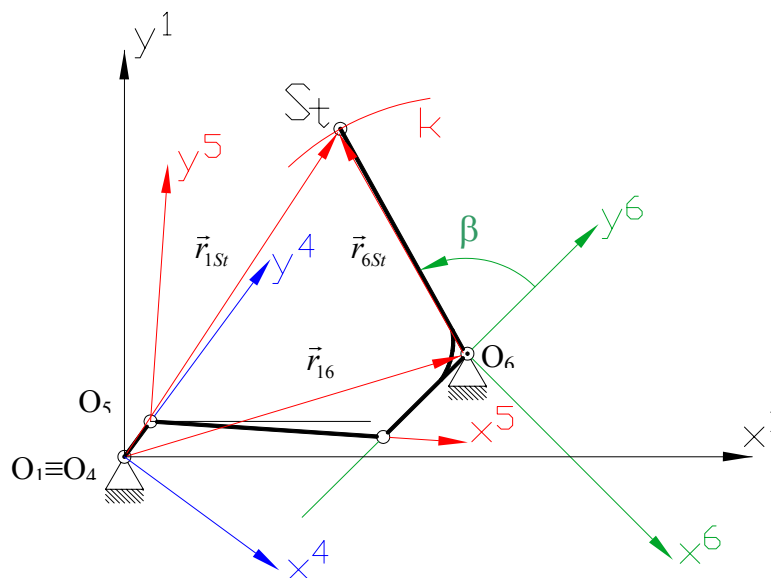
$$\mathcal{A}(\varphi) = \arcsin \frac{c^2 + l^2 + b^2 + k^2 - d^2 + 2lb \sin \varphi + 2bk \cos \varphi}{-\sqrt{(2cb \sin \varphi - 2cl)^2 + (2ck - 2cb \cos \varphi)^2}} - \arctg \frac{2cb \sin \varphi - 2cl}{2ck - 2cb \cos \varphi}, \quad (9)$$

Pro určení  $\dot{\mathcal{A}}$  byla derivována rovnice (8)

$$2cb(\cos \varphi \dot{\varphi} \cos \mathcal{A} - \sin \mathcal{A} \dot{\mathcal{A}} \sin \varphi) + 2cl \sin \mathcal{A} \dot{\mathcal{A}} + 2ck \cos \mathcal{A} \dot{\mathcal{A}} + 2cb(\sin \varphi \dot{\varphi} \sin \mathcal{A} - \cos \varphi \cos \mathcal{A} \dot{\mathcal{A}}) - 2lb \cos \varphi \dot{\varphi} + 2bk \sin \varphi \dot{\varphi} = 0,$$

$$\dot{\mathcal{A}} = \frac{b[l \cos \varphi \dot{\varphi} - c(\cos \varphi \dot{\varphi} \cos \mathcal{A} - \dot{\varphi} \sin \mathcal{A}) - k \sin \varphi \dot{\varphi}]}{c[(l \sin \mathcal{A} + k \cos \mathcal{A}) - b(\sin \mathcal{A} \sin \varphi + \cos \varphi \mathcal{A})]}.$$

### 5.3 Trajektorie středu tmelky $S_t$ v základním prostoru



Obr. 14 - Určení polohy středu tmelky

Pro pohyb bodu  $S_t$  (křivka  $k$ ) byla napsána transformační rovnice (10), která po dosazení za globální a lokální polohové vektory přejde do tvaru (11).

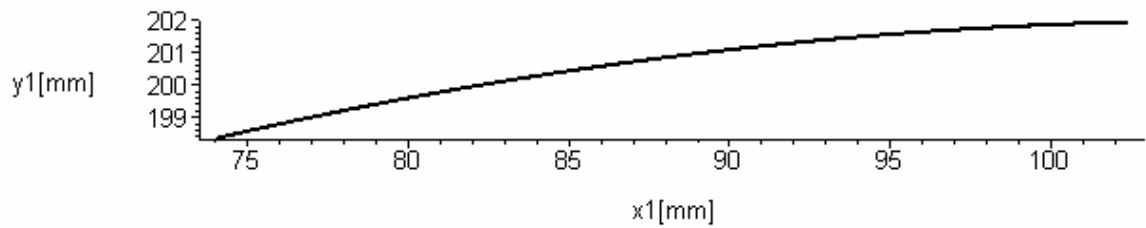
$$\mathbf{r}_{St}^1 = \mathbf{r}_6^1 + \mathbf{T}^{16} \mathbf{r}_{St}^6. \quad (10)$$

Z rovnice (10) je možno stanovit polohu středu tmelky  $S_t$  v základním prostoru 1 v souřadnicích  $x_{st}$  a  $y_{st}$ .

$$\begin{bmatrix} x_{St} \\ y_{St} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l \\ k \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi(\varphi) & \sin \psi(\varphi) & 0 \\ -\sin \psi(\varphi) & \cos \psi(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r \sin \beta \\ r \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (11)$$

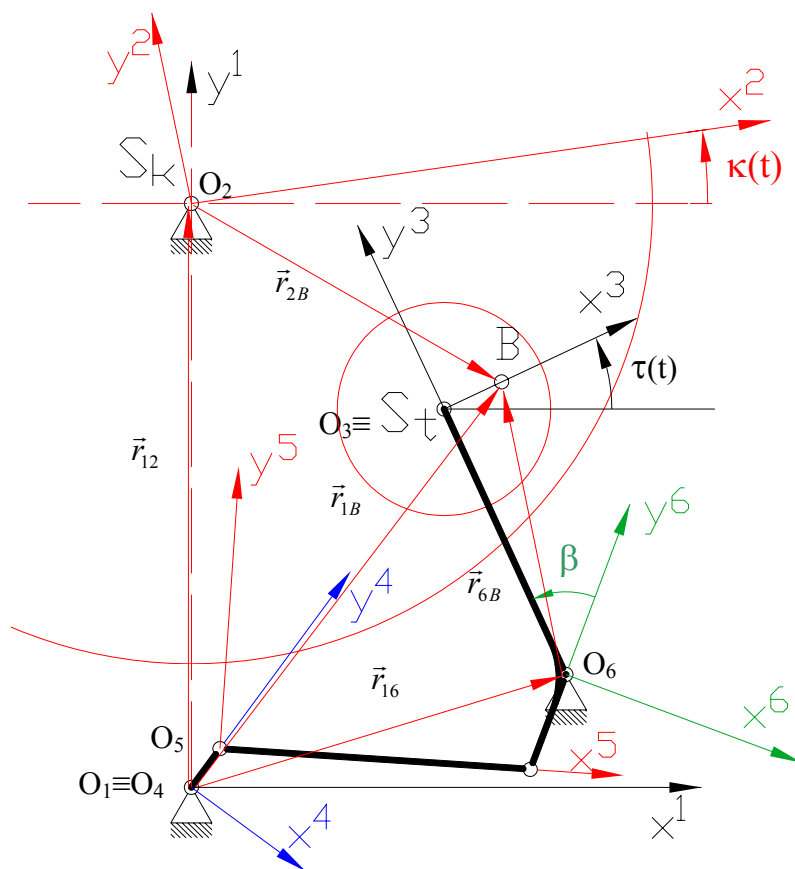
$$x_{St} = l - \cos \psi(\varphi) r \sin \beta + \sin \psi(\varphi) r \cos \beta$$

$$y_{St} = k + \sin \psi(\varphi) r \sin \beta + \cos \psi(\varphi) r \cos \beta$$



**Graf 1 - Poloha středu tmelky vzhledem k rámu**

## 5.4 Trajektorie obecného bodu tmelky v prostoru kotouče 2



Obr. 15 - Schéma rozboru pohybu obecného bodu tmelky po kotouči

Pro určení trajektorie obecného bodu B tmelky po kotouči 2 lze sestavit dva vektorové trojúhelníky  $O_1, S_k, B$  a  $O_1, O_6, B$ , popsané rovnicemi

$$\vec{r}_{12} + \vec{r}_{2B} = \vec{r}_{1B}, \quad (12)$$

$$\vec{r}_{16} + \vec{r}_{6B} = \vec{r}_{1B}. \quad (13)$$

Po vyjádření vektorových rovnic (12) a (13) byly sestaveny transformační rovnice (14) a (15), což jsou složkové rovnice.

$$\mathbf{r}_B^1 = \mathbf{r}_2^1 + \mathbf{T}^{12} \mathbf{r}_B^2, \quad (14)$$

$$\mathbf{r}_B^1 = \mathbf{r}_3^1 + \mathbf{T}^{13} \mathbf{r}_B^3 \quad \text{a} \quad \mathbf{r}_3^1 = \mathbf{r}_6^1 + \mathbf{T}^{16} \mathbf{r}_3^6,$$



po úpravě

$$\mathbf{r}_B^1 = \mathbf{r}_6^1 + \mathbf{T}^{16}\mathbf{r}_3^6 + \mathbf{T}^{13}\mathbf{r}_B^3. \quad (15)$$

Z rovnice (14) byl vyjádřen složkový vektor  $\mathbf{r}_B^2$ , ovšem bylo zapotřebí určit složkový vektor  $\mathbf{r}_B^1$  z rovnice (15). Po dosazení do rovnice (16) a dalších úpravách byla určena složková rovnice (17).

$$\mathbf{r}_B^1 - \mathbf{r}_2^1 = \mathbf{T}^{12}\mathbf{r}_B^2,$$

$$(\mathbf{T}^{12})^T(\mathbf{r}_B^1 - \mathbf{r}_2^1) = \mathbf{r}_B^2, \quad (16)$$

$$\mathbf{r}_B^2 = (\mathbf{T}^{12})^T(\mathbf{r}_6^1 + \mathbf{T}^{16}\mathbf{r}_3^6 + \mathbf{T}^{13}\mathbf{r}_B^3 - \mathbf{r}_2^1). \quad (17)$$

Po doplnění rovnice (17) o transformační matice a polohové vektory byl určen vektor  $\mathbf{r}_B^2$ .

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_B^2 \\ y_B^2 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \kappa(t) & -\sin \kappa(t) & 0 \\ \sin \kappa(t) & \cos \kappa(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \cdot \left[ \begin{bmatrix} l \\ k \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \psi(\varphi) & \sin \psi(\varphi) & 0 \\ -\sin \psi(\varphi) & \cos \psi(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r \sin \beta \\ r \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \right] + \\ &+ \begin{bmatrix} \cos \tau(t) & -\sin \tau(t) & 0 \\ \sin \tau(t) & \cos \tau(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B^3 \\ y_B^3 \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 \\ n \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

po roznásobení

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_B^2 &= \begin{bmatrix} \cos \kappa(t)(l - \cos \psi(t)r \sin(\beta) + \sin \psi(t)r \cos \beta + \cos \tau(t)x_B^3 - \sin \tau(t)y_B^3) + \\ -\sin \kappa(t)(l - \cos \psi(t)r \sin(\beta) + \sin \psi(t)r \cos \beta + \cos \tau(t)x_B^3 - \sin \tau(t)y_B^3) + \\ 0 \\ + \sin \kappa(t)(k + \sin \psi(t)r \sin \beta + \cos \psi(t)r \cos \beta + \sin \tau(t)x_B^3 + \cos \tau(t)y_B^3 - n) \\ + \cos \kappa(t)(k + \sin \psi(t)r \sin \beta + \cos \psi(t)r \cos \beta + \sin \tau(t)x_B^3 + \cos \tau(t)y_B^3 - n) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17) \end{aligned}$$

Ve složkovém vektoru  $\mathbf{r}_B^2$  znázorňují  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$  a  $\varphi(t)$  natočení kotouče, tmelky a členu pohonu čtyřkloubového mechanismu.

Pro řešení byly natočení jednotlivých členů voleny následovně

$$\begin{aligned}\kappa(t) &= 2 \pi n_{21} t, \\ \tau(t) &= 2 \pi n_{31} t, \\ \varphi(t) &= 2 \pi n_{41} t,\end{aligned}\tag{18}$$

kde

$n_{21}$  .....otáčky kotouče vzhledem k rámu,

$n_{31}$  .....otáčky tmelky vzhledem k rámu,

$n_{41}$  .....otáčky členu 4 čtyřkloubového mechanismu vzhledem k rámu.

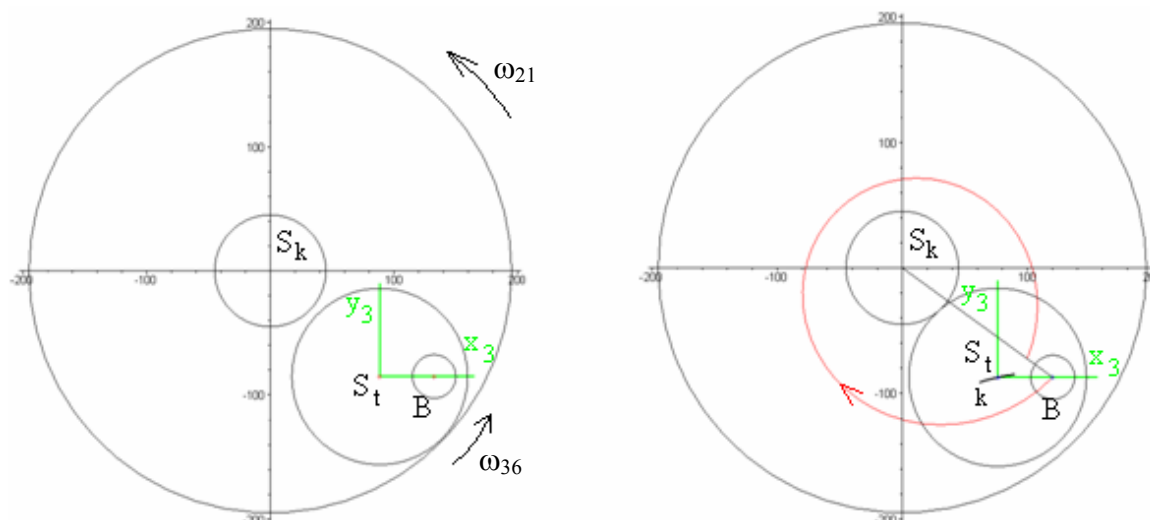
K simulacím trajektorií a výpočtům, u nichž není uvedeno jinak, bylo použito kladné orientace a nastavení otáček z kapitoly 3.3, tj.

$$n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}, \quad n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}, \quad n_{41} = 0,9 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1},$$

a rozměrů stroje v metrech,

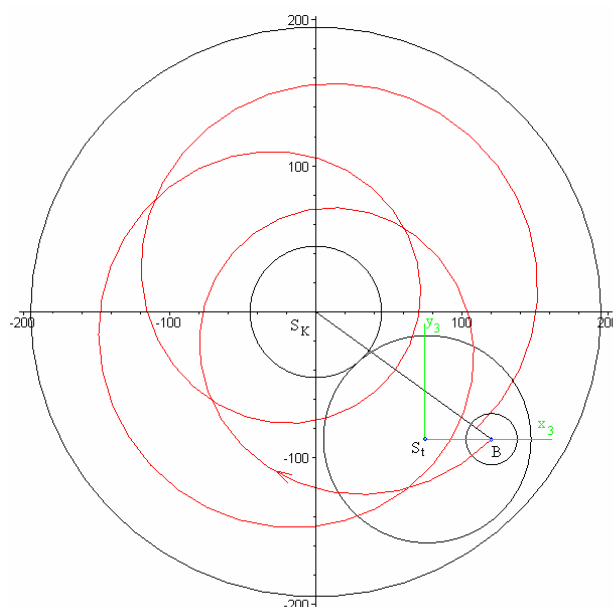
$$\begin{aligned}b &= 0,006, & c &= 0,100, & d &= 0,060, & k &= 0,060, & l &= 0,106, \\ n &= 0,286, & r &= 0,142, & x_B^3 &= 0,044, & y_B^3 &= 0,0, & \beta &= 13^\circ.\end{aligned}$$

Trajektorie obecného bodu B tmelky byla vykreslena v prostoru brusného kotouče (Obr. 16) se středem  $S_k$ , v jeho vnitřní části byla znázorněna menší kružnicí prohlubeň, jak je tomu u skutečného brousícího stroje. Pro názornost byla zobrazena počáteční poloha středu tmelky  $S_t$  a bodu B, který reprezentuje střed obroku na tmelce, jako tomu bylo v Obr. 3. Šipka v Obr. 16 znázorňuje smysl trajektorie vzájemného pohybu bodu B tmelky vzhledem k brousícímu kotouči.



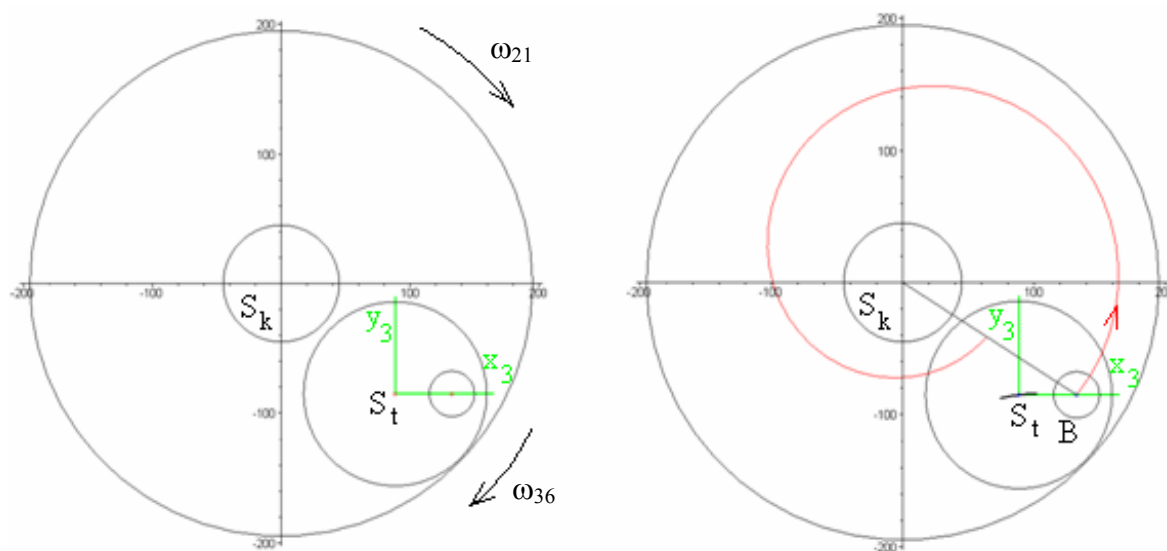
**Obr. 16 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči**

Je zřejmé, že při mnohem vyšším počtu otáček se vyskytnou oblasti s vyšší četností průsečíků, viz Obr. 17 nebo s lokalitami kde jsou trajektorie zhuštěnější. Při větším počtu otáček jsou trajektorie obecného bodu B značně nepřehledné a jen stěží z nich lze mnoho určit, musí se volit přiměřený počet otáček, jelikož u výrazně vyšších hodnot dochází k vytvoření mezikruží plně vyplněným trajektoriemi,

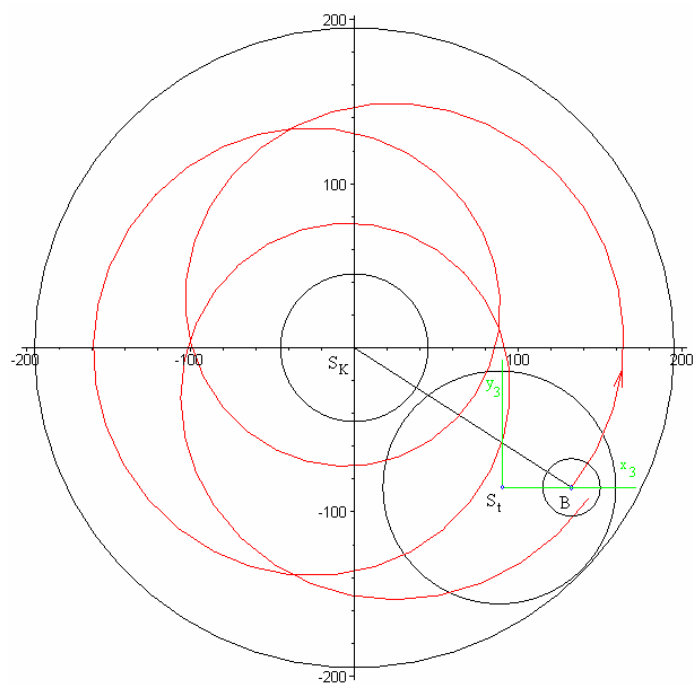


**Obr. 17 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách**

Následující Obr. 18 a 19 znázorňují trajektorie relativního pohybu bodu tmelky vzhledem k brusnému kotouči v případě, kdy je záporný smysl natočení  $\kappa(t), \tau(t)$ , viz Obr. 15, jako tomu je u brousícího stroje ve firmě CRYTUR, spol. s r.o. v Turnově.

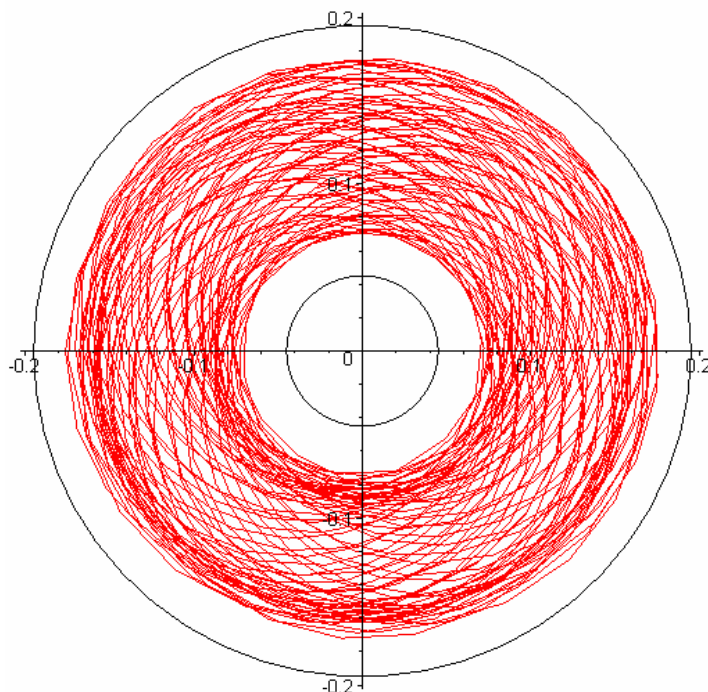


**Obr. 18 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči**



**Obr. 19 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách**

Delší dobou simulace vznikly obrazce skládající se z velkého počtu přes sebe překrývajících se trajektorií obecného bodu tmelky B po kotouči (Obr. 20). Čas simulace byl volen  $t = 90\text{ s}$ , při kterém lze z četností překrytí stanovit závěr pouhým pohledem.

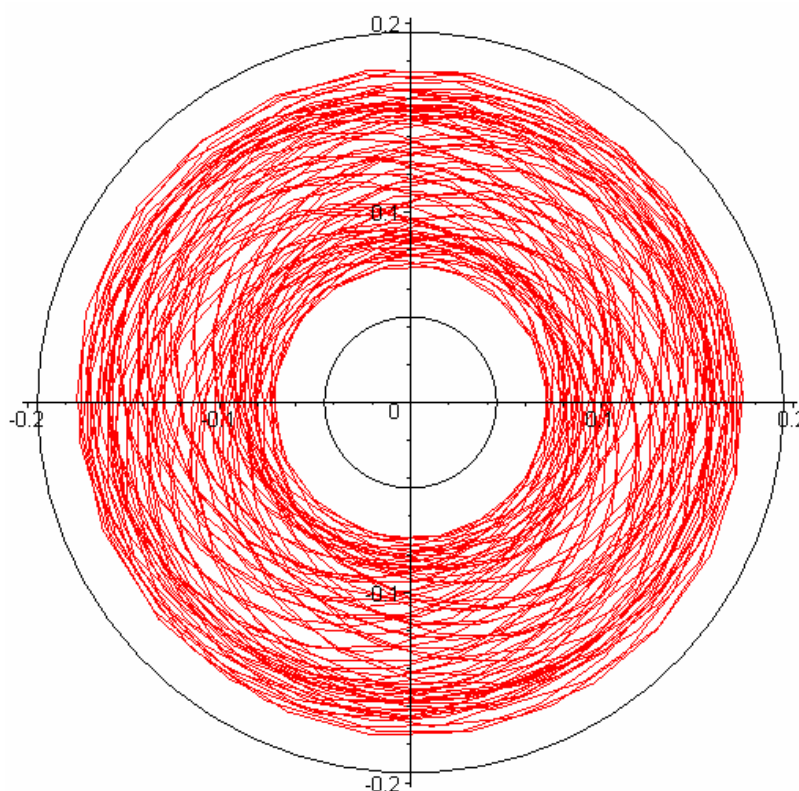


**Obr. 20 - Trajektorie relativního pohybu bodu tmelky B vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách ( $t = 90\text{ s}$ ,  $n_{21} = 0,847\text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443\text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**

V Obr. 20 nedochází k plynulému rozložení drah po povrchu brusného kotouče. V levé dolní části kotouče dochází k zjevnému nárůstu překrývajících se trajektorií obecného bodu B. V místě, jako je v levé dolní části (Obr. 20), bude jistě docházet k rychlejšímu opotřebení brusného kotouče, a to i ke vzniku tak zvaných hrbolů či dolíčků, které se negativně podílejí na rovinnosti obrobku. Tato simulace byla navržena tak, aby při nastavení otáček byl brán v potaz prokluz tmelky vůči kotouči.

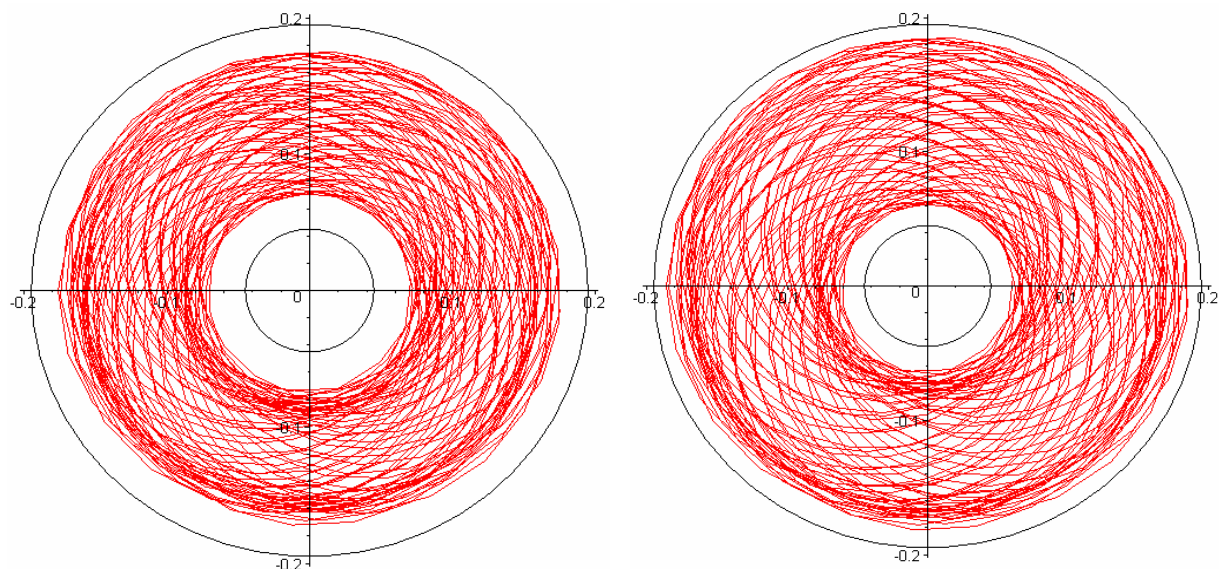
V případě, že by tmelka byla nuceně hnána, bylo by nutno zvážit, jakými otáčkami by se měla otáčet a k jakým hodnotám prokluzu by tedy mělo docházet a zda-li by to bylo žádoucí nebo ne. Pro tento případ byla provedena série pokusů, při kterých v matematickém modelu byly měněny pouze otáčky tmelky. Ukázalo se, že při otáčkách tmelky  $n_{31} = 0,5\text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$  bylo rozprostření trajektorií po povrchu rovnoměrnější, jak je patrné z Obr. 21. Tento závěr je pouze subjektivního charakteru.

Pro budoucí posuzování by bylo vhodné sestavit statistický model, ve kterém by vystupovala funkce průsečíku trajektorie obecného bodu B v intervalu a v přesně definované vzdálenosti a směru od středu brusného kotouče. Z průběhu četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky vzhledem k brousícímu kotouči by poté bylo možno usuzovat optimální opotřebení z rozložení trajektorií.

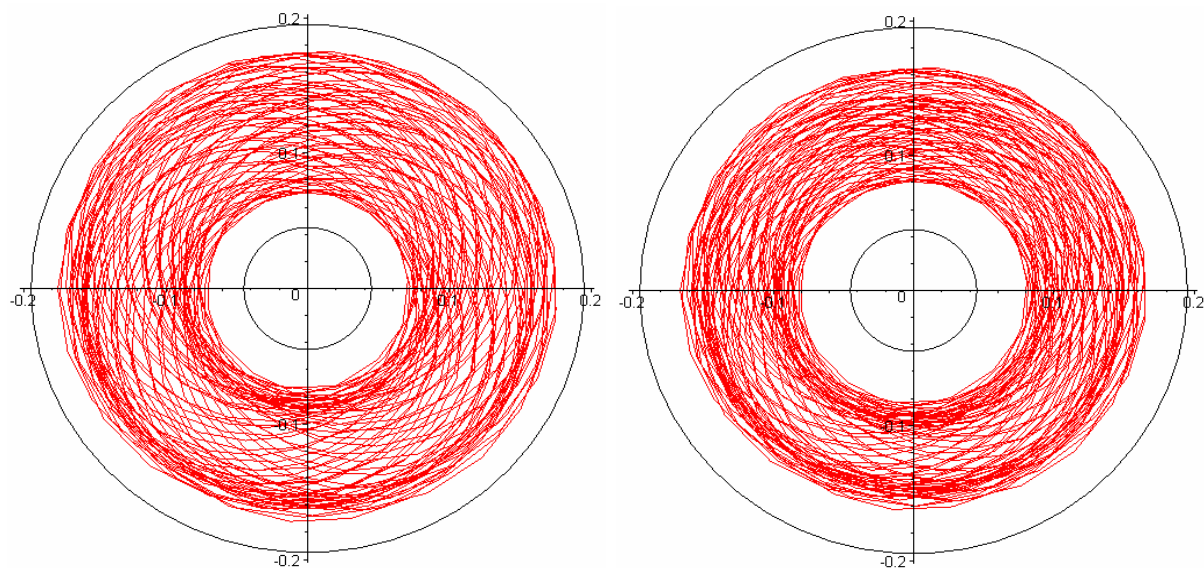


**Obr. 21 - Trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky vzhledem k brusnému kotouči při třech otáčkách ( $t = 90 \text{ s}$ ,  $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,5 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**

Při posuzování vlivu vzdálenosti obecného bodu B na tmelce, který reprezentuje střed obrobku, byla opět simulována trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky vzhledem k brousícímu kotouči při změně vzdálenosti. Pro tuto potřebu byla simulována trajektorie, a to pro vzdálenější a méně vzdálené body B, viz Obr. 22 a 23. U vzdálenějšího bodu B tmelky (Obr. 22) dochází k rozložení trajektorie po větší části povrchu kotouče. Naproti tomu v případě menší vzdálenosti bodu B od středu tmelky (Obr. 23) dochází ke zhuštění těchto trajektorií, lze tedy předpokládat, že menší vzdálenost bodu B povede k nerovnoměrnému opotřebení brusného kotouče.



**Obr. 22 - Vliv změny umístění obrobků na rozložení trajektorií relativního pohybu bodu B tmelky  
vzhledem k brusnému kotouči (vlevo na poloměru 44 mm vpravo na poloměru 54 mm,  $t = 90$  s,  
 $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**



**Obr. 23 - Vliv změny umístění obrobků na rozložení trajektorií relativního pohybu bodu B tmelky  
vzhledem k brusnému kotouči (vlevo na poloměru 44 mm vpravo na poloměru 34 mm,  $t = 90$  s,  
 $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**

## 5.5 Délka trajektorie obecného bodu tmelky v prostoru kotouče

Pro jednoduchou hladkou křivku  $\Gamma$  v  $\mathbb{R}^n$ , která je vyjádřena parametrickými rovnicemi

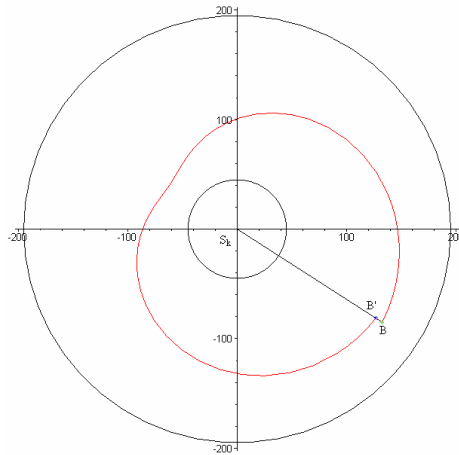
$$\begin{aligned}x_1 &= \varphi_1(t), \\x_2 &= \varphi_2(t), \\&\vdots \\x_n &= \varphi_n(t), \quad t \in \langle a, b \rangle,\end{aligned}$$

platí

$$\int_{\Gamma} f(x_1, \dots, x_n) ds = \int_a^b f(\varphi_1(t), \dots, \varphi_n(t)) \sqrt{(\dot{\varphi}_1(t))^2 + \dots + (\dot{\varphi}_n(t))^2} dt.$$

Délka křivky  $L(\Gamma)$  je

$$L(\Gamma) = \int_{\Gamma} 1 ds. \quad [10] \quad (19)$$



**Obr. 24 - Trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky vzhledem k brusnému kotouči**

Nejprve bylo nutné určit čas, ve kterém obecný bod B tmelky opíše úhel  $2\pi$  v prostoru kotouče. Při výpočtu tohoto času metodou sečen bylo využito podobnosti směrového úhlu spojnice bodu trajektorie se středem kotouče.

$$\tan \frac{y_B^2(0)}{x_B^2(0)} = \tan \frac{y_B^2(t)}{x_B^2(t)},$$



po úpravě

$$f(t) = \tan \frac{y_B^2(0)}{x_B^2(0)} - \tan \frac{y_B^2(t)}{x_B^2(t)},$$

$$f(t) = K - \tan \frac{y_B^2(t)}{x_B^2(t)}, \quad (20)$$

Vztah pro výpočet i-tého kroku iterace metodou sečen je tedy

$$x_i = \frac{x_{i-2}f(x_{i-1}) - x_{i-1}f(x_{i-2})}{f(x_{i-1}) - f(x_{i-2})}, \quad (21)$$

kde

$x_0 = a_0$  a  $x_1 = b_0$  jsou počáteční hodnoty.

Po dosazení do vztahu (19) za  $ds$  je délka křivky určena následovně

$$L(t) = \int_{x_0}^{x_i} \sqrt{x_B^2(t)^2 + y_B^2(t)^2} \cdot dt \quad (22)$$

## 5.6 Vliv změny úhlu nastavení kyvného unášivého ramene na délku trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče

Při výrobě na brousícím stroji může pracovník zvolit téměř libovolný úhel  $\beta$ , který je omezen pouze podmínkou stálého kontaktu rolničiek kyvného ramene s tmelkou. Z tohoto důvodu byl proveden výpočet délky trajektorie obecného bodu B tmelky po kotouči při měnícím se úhlu nastavení  $\beta$ . Výpočet byl proveden dle vztahu (22).

Pro názornost byl uveden postup výpočtu času metodou sečen, kdy obecný bod B tmelky opíše úhel  $2\pi$  okolo osy kotouče. Za počáteční hodnoty v metodě sečen bylo dosazeno  $a_0 = 1$  a  $b_0 = 1,3$  pro tento případ, potom dosazením

$$x_0 = 1,$$

$$x_1 = 1,3,$$

do (21) bylo určeno

$$x_2 = \frac{x_0 f(x_1) - x_1 f(x_0)}{f(x_1) - f(x_0)} = 1,314799121,$$

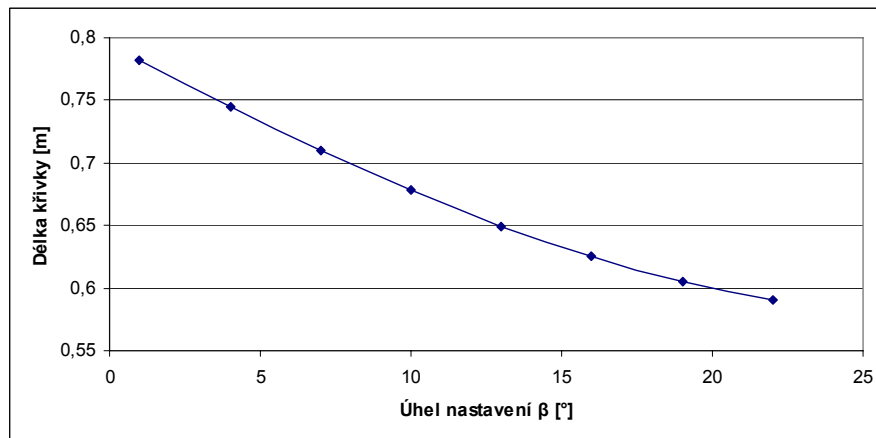
$$\vdots$$

$$x_7 = \frac{x_5 f(x_6) - x_6 f(x_5)}{f(x_6) - f(x_5)} = 1,273167585.$$

Délka křivky, viz Obr. 24, byla spočtena jako

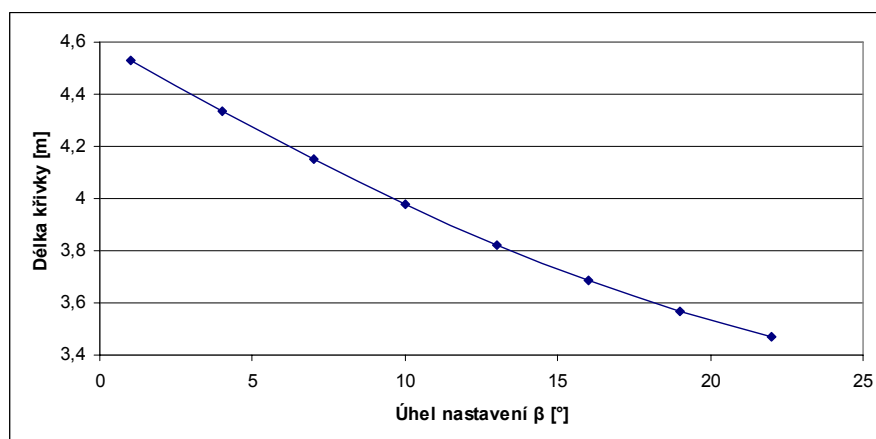
$$L(t) = \int_{x_0}^{x_7} \sqrt{x_B^2(t)^2 + y_B^2(t)^2} \cdot dt.$$

Pro případ, kdy obecný bod B tmelky opíše jednu otáčku vzájemného pohybu o velikosti  $2\pi$  v prostoru kotouče, byla sestavena následující závislost, viz Graf 2. V grafu si lze povšimnout, že při změně úhlu  $\beta$  (úhlu nastavení kyvného ramene) dojde ke změně délky křivky. Vzniklou závislost nelze proložit přímkou, což vypovídá o tom, že daná závislost úhlu nastavení kyvného ramene na délce trajektorie není lineární.



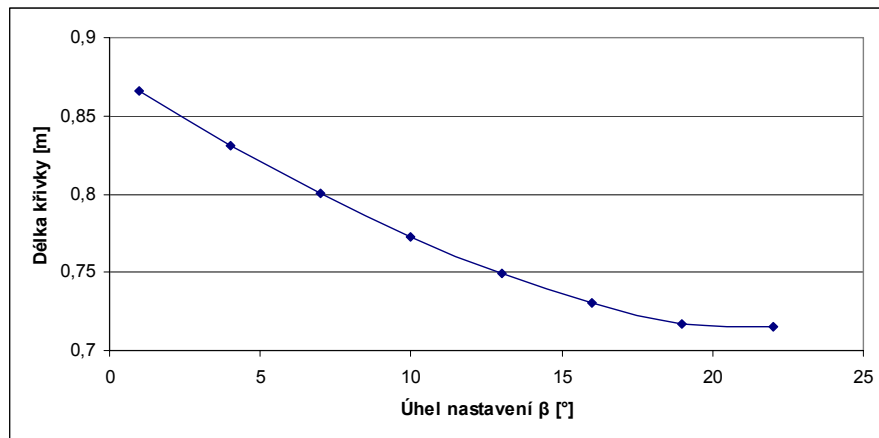
**Graf 2 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu  $\beta$**

Graf 3 je též grafem závislosti délky křivky na změně úhlu, pouze se změnou počtu otáček kolem osy kotouče. V tomto případě bylo zvoleno pět otáček.



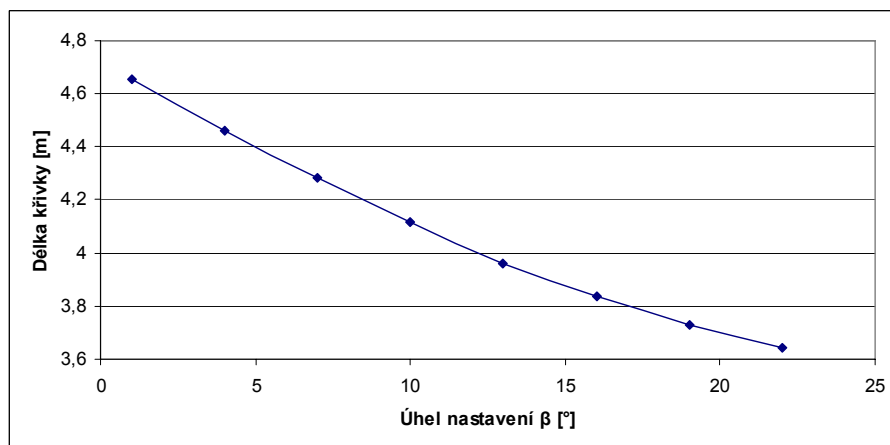
**Graf 3 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu  $\beta$  (pět otáček)**

Pro případ, kdy se otáčí kotouč i tmelka doprava, byly též sestrojeny grafy závislosti úhlu nastavení kyvného ramene na délce trajektorie, viz Graf 4 a 5. V tomto případě je délka trajektorii větší. Dále bylo zpozorováno větší zakřivení závislosti v Grafu 4 pro jednu otáčku, které se zmenšuje pro větší uhly  $\beta$ .



**Graf 4 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu  $\beta$  , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$**

Z těchto grafů lze usuzovat, že při větším úhlu nastavení daný bod B tmelky urazí menší vzdálenost a tudíž povrch obrobku bude nejspíš méně obroben.

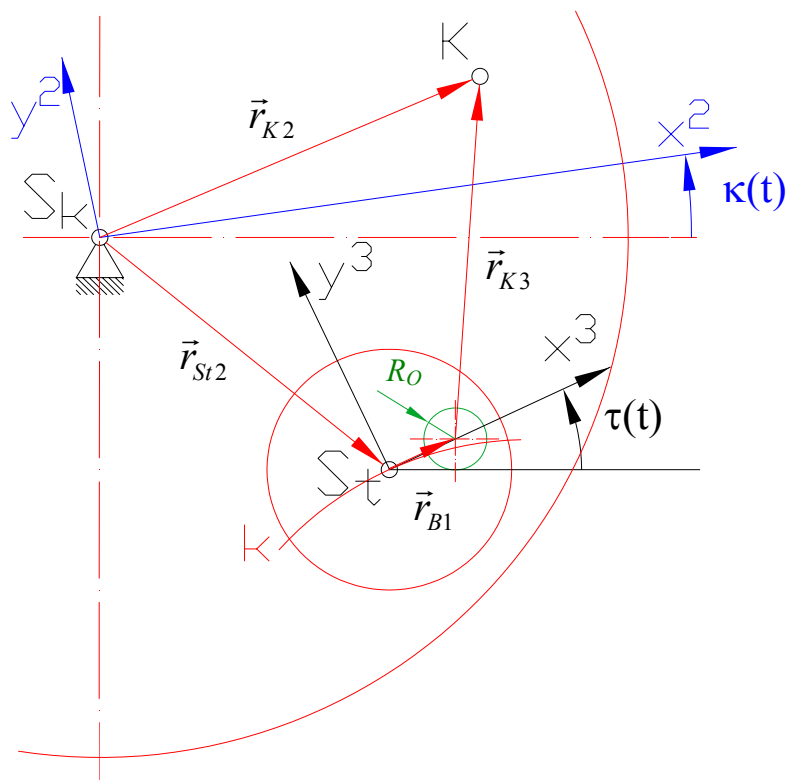


**Graf 5 - Závislost délky trajektorie bodu tmelky v prostoru kotouče na úhlu  $\beta$  (pět otáček), záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$**

Dalším krokem by bylo vhodné zjistit pomocí měření na daném stroji, jak se nastavení kyvného ramene projeví na rovinnost kotouče a obrobků. Tento krok byl záměrně vynechán z důvodů toho, že není k dispozici měřicí zařízení, které by bylo schopné povrch kotouče změřit. Za současného stavu by se muselo toto měření provést externí firmou, což je v danou chvíli ekonomicky neefektivní. Návrh měřicího zařízení, viz kapitola 6.

## 5.7 Trajektorie obecného bodu kotouče v prostoru tmelky

Trajektorií, kterou vykoná obecný bod K po povrchu obrobku, je ve skutečnosti dráha, při které dochází k broušení čelní plochy monokrystalu. K tomu dochází v případě, že  $|R_o| = |\vec{r}_{K3}|$ . Monokrystal v Obr. 25 je znázorněn pomocí kružnice s poloměrem  $R_o$ .



Obr. 25 - Schéma rozboru pohybu obecného bodu kotouče po povrchu tmelky

Pro výpočet trajektorie relativního pohybu obecného bodu K kotouče po obrobku na tmelce, byl sestrojen vektorový obrazec, viz Obr. 25, jenž je popsán vztahem

$$\vec{r}_{K2} = \vec{r}_{St2} + \vec{r}_{B1} + \vec{r}_{K3}, \quad (23)$$

po úpravě

$$\vec{r}_{K3} = \vec{r}_{K2} - \vec{r}_{St2} - \vec{r}_{B1}. \quad (24)$$

Vektor  $\vec{r}_{St2}$  zahrnuje kývavý pohyb tmelky od čtyřkloubového mechanismu. Tento vektor lze určit z vektorového obrazce  $O_1, O_2, S_t$  v (Obr. 15), který byl popsán rovnicí

$$\vec{r}_{St1} = \vec{r}_{21} + \vec{r}_{St2}, \quad (25)$$

po úpravě

$$\vec{r}_{St2} = \vec{r}_{St1} - \vec{r}_{21}. \quad (26)$$

Složkové tvary:

$$\mathbf{r}_{St}^2 = \mathbf{r}_6^1 + \mathbf{T}^{16} \mathbf{r}_{St}^6 - \mathbf{r}_2^1,$$

$$\mathbf{r}_B^1 = \mathbf{T}^{13} \mathbf{r}_B^3, \quad \mathbf{r}_K^1 = \mathbf{T}^{12} \mathbf{r}_K^2.$$

Po vyjádření neznámých v rovnici (24) byla stanovena složková rovnice (27), která vyjadřuje vektor  $\vec{r}_{K3}$

$$\mathbf{r}_K^3 = \mathbf{T}^{12} \mathbf{r}_K^2 - \mathbf{r}_6^1 - \mathbf{T}^{16} \mathbf{r}_{St}^6 + \mathbf{r}_2^1 - \mathbf{T}^{13} \mathbf{r}_B^3. \quad (27)$$

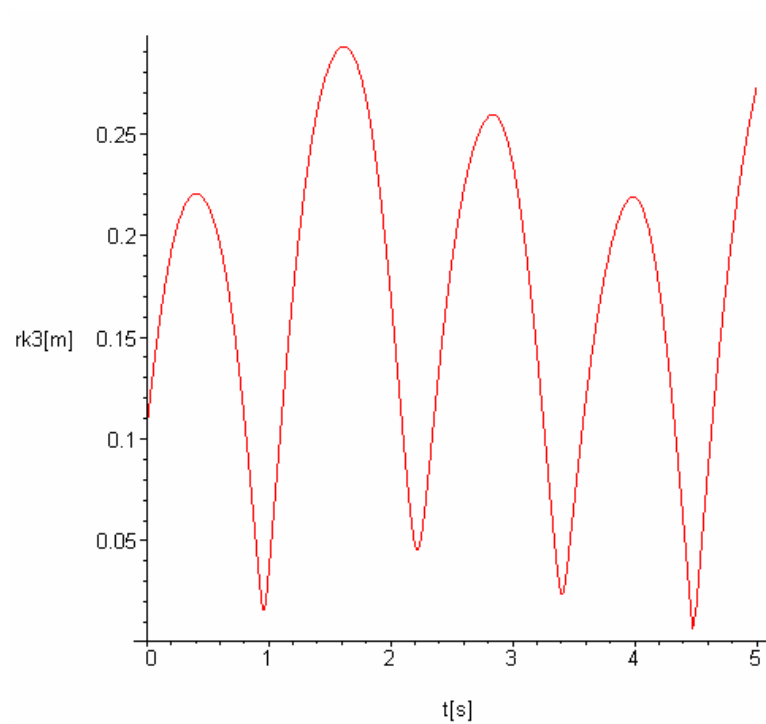
Po doplnění rovnice (27) o transformační matice a polohové vektory

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_K^3 \\ y_K^3 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos \kappa(t) & -\sin \kappa(t) & 0 \\ \sin \kappa(t) & \cos \kappa(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_K \\ y_K \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} l \\ k \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \psi(\varphi) & \sin \psi(\varphi) & 0 \\ -\sin \psi(\varphi) & \cos \psi(\varphi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -r \sin \beta \\ r \cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} 0 \\ n \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \cos \tau(t) & -\sin \tau(t) & 0 \\ \sin \tau(t) & \cos \tau(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_B^3 \\ y_B^3 \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

po roznásobení

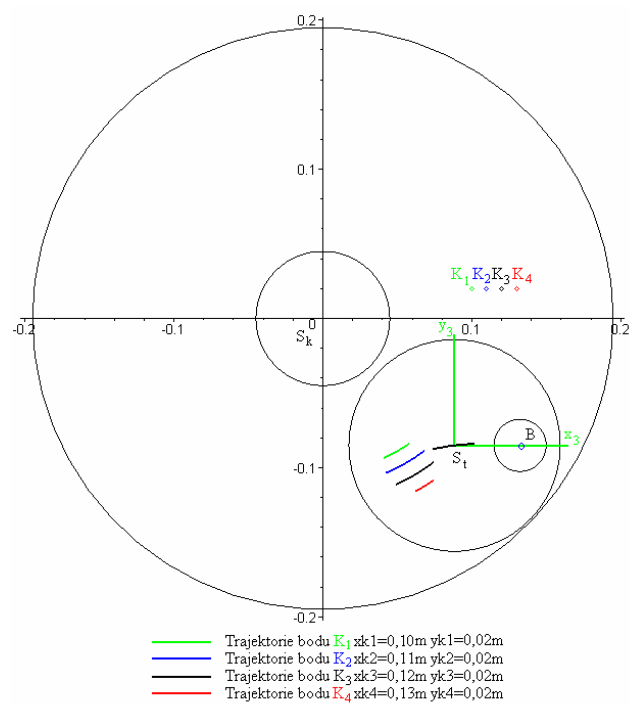
$$\mathbf{r}_K^3 = \begin{bmatrix} x_K \cos \kappa(t) - y_K \sin \kappa(t) - l + r \cos \psi(t) \sin \beta - r \sin \psi(t) \cos \beta - x_B^3 \cos \tau(t) + y_B^3 \sin \tau(t) \\ x_K \sin \kappa(t) + y_K \cos \kappa(t) - k + n - r \sin \psi(t) \sin \beta - r \cos \psi(t) \cos \beta - x_B^3 \sin \tau(t) - y_B^3 \cos \tau(t) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Velikost vektoru  $\vec{r}_{K3}$  byla vyjádřena v čase a vykreslena v Grafu 6. Pro měnící se souřadnici  $x_K$  obecného bodu K brusného kotouče byly poté určeny časy, kdy dochází k broušení při první otáčce kotouče.



**Graf 6 - Průběh velikosti vektoru  $\vec{r}_{K3}$  v čase**

Pro takto vypočtené časy byla pomocí vektoru  $\vec{r}_{K2}$  vykreslena trajektorie obecného bodu  $K_{1-4}$  (Obr. 26) se znázorněním počáteční polohy tmelky a obecných bodů  $K_{1-4}$ .



**Obr. 26 - Trajektorie obecných bodů kotouče K po povrchu tmelky**

## 5.8 Relativní rychlost obecného bodu tmelky na kotouči

Pro výpočet relativní rychlosti obecného bodu B bylo využito Obr. 15. Derivací vztahu (15) byla stanovena absolutní rychlost  ${}^3(\mathbf{v}_B^1)$  bodu B na tělese 3 (tmelce),

$${}^3(\mathbf{v}_B^1) = \dot{\mathbf{r}}_B^1 = \dot{\mathbf{T}}^{16} \mathbf{r}_3^6 + \dot{\mathbf{T}}^{13} \mathbf{r}_B^3. \quad (28)$$

Dále byla určena absolutní rychlost  ${}^2(\mathbf{v}_B^1)$  bodu B na tělese 2 (kotouči) z derivované rovnice (14),

$${}^2(\mathbf{v}_B^1) = \dot{\mathbf{r}}_B^1 = \dot{\mathbf{T}}^{12} \mathbf{r}_B^2 + \mathbf{T}^{12} \dot{\mathbf{r}}_B^2. \quad (29)$$

Obecně je  $\mathbf{r}_B^2(\kappa, \tau, \varphi)$ , ale v této konkrétní situaci je považováno  $\mathbf{r}_B^2$  za konstantu. Člen  $\mathbf{T}^{12} \dot{\mathbf{r}}_B^2$  je tedy z výše jmenovaných důvodů roven nule. Relativní rychlost  $\mathbf{v}_{23}$  je rovna

$$\mathbf{v}_{23} = {}^3(\mathbf{v}_B^1) - {}^2(\mathbf{v}_B^1) = \dot{\mathbf{T}}^{16} \mathbf{r}_3^6 + \dot{\mathbf{T}}^{13} \mathbf{r}_B^3 - \dot{\mathbf{T}}^{12} \mathbf{r}_B^2. \quad (30)$$

Po doplnění rovnic o transformační matice a polohové vektory byly určeny jednotlivé absolutní rychlosti a vektor relativní rychlosti ve složkovém tvaru

$$\begin{aligned} {}^2(\mathbf{v}_B^1) = & \left[ \frac{d}{dt} \kappa(t) (k + r \sin \psi(t) \sin \beta + x_B^3 \cos \psi(t) + y_B^3 \cos \tau(t) - n), \frac{d}{dt} \kappa(t) (-l + \right. \\ & \left. + r \cos \psi(t) \sin \beta - r \sin \psi(t) \cos \beta - x_B^3 \cos \tau(t) + y_B^3 \sin \tau(t), 0) \right], \\ \mathbf{v}_{23} = & \left[ r \sin \psi(t) \frac{d}{dt} \psi(t) \sin \beta + r \cos \psi(t) \frac{d}{dt} \psi(t) \cos \beta - x_B^3 \sin \tau(t) \frac{d}{dt} \tau(t) - y_B^3 \cos \tau(t) \frac{d}{dt} \tau(t) - \right. \\ & - k \frac{d}{dt} \kappa(t) - r \sin \psi(t) \sin \beta \frac{d}{dt} \kappa(t) - r \cos \psi(t) \cos \beta \frac{d}{dt} \kappa(t) - x_B^3 \sin \tau(t) \frac{d}{dt} \kappa(t) - \\ & - y_B^3 \cos \tau(t) \frac{d}{dt} \kappa(t) + n \frac{d}{dt} \chi(t), r \sin \beta \cos \psi(t) \frac{d}{dt} \psi(t) - r \cos \beta \sin \psi(t) \frac{d}{dt} \psi(t) + \\ & + x_B^3 \cos \tau(t) \frac{d}{dt} \tau(t) - y_B^3 \sin \tau(t) \frac{d}{dt} \tau(t) + l \frac{d}{dt} \kappa(t) - r \cos \psi(t) \sin \beta \frac{d}{dt} \kappa(t) + \\ & \left. + r \sin \psi(t) \cos \beta \frac{d}{dt} \chi(t) + x_B^3 \cos \tau(t) \frac{d}{dt} \kappa(t) - y_B^3 \sin \tau(t) \frac{d}{dt} \kappa(t), 0 \right]. \end{aligned}$$



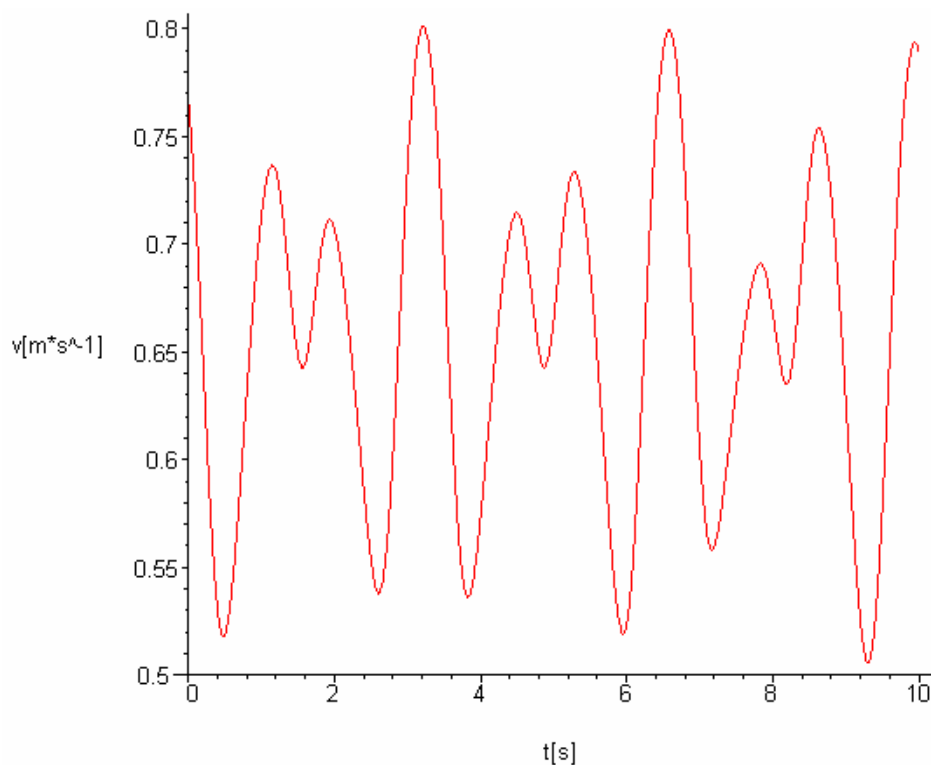
Velikost relativní rychlosti  $\mathbf{v}_{23}$  je

$$|\mathbf{v}_{23}(t)| = \sqrt{v_{23x}(t)^2 + v_{23y}(t)^2 + v_{23z}(t)^2}, \quad (31)$$

kde,

$$v_{23z}(t)^2 = 0.$$

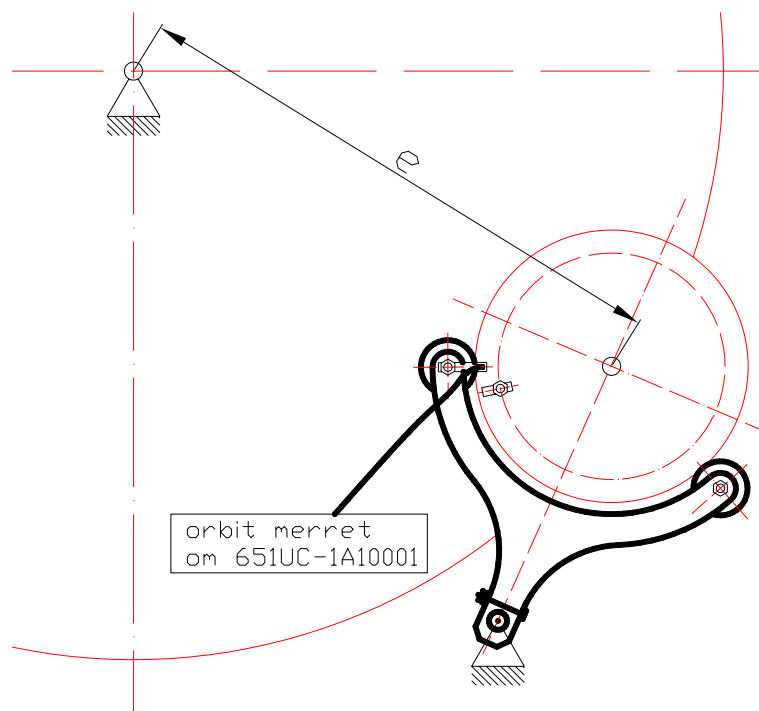
Vypočtená hodnota velikosti relativní rychlosti  $\mathbf{v}_{23}(t)$  dle vztahu (31) byla znázorněna v Grafu 7. Tato rychlost byla vypočtena pro nuceně hnanou tmelku navrženým natočením  $\tau(t)$  (18). Pro případ výpočtu relativní rychlosti  $\mathbf{v}_{23}(t)$  volně se otáčející tmelky by bylo zapotřebí znát přesný průběh pohybu tmelky  $\omega_{36}(t)$ . U měření, které bylo provedeno k zmapování pohybu tmelky v kapitole 4, by bylo zapotřebí mnohem většího počtu pulsů, aby toto měření podávalo výsledky na úrovni k tomuto výpočtu potřebné.



**Graf 7 - Průběh velikosti relativní rychlosti, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$**

## 6 Měření otáček tmelky při zapnutém kyvu

Pro stanovení matematického modelu broušení volným brusivem je nezbytné důkladně znát samotný děj. Je nutné znát, jak rozměry těles, tak i jejich rychlosti. K určení rychlostí, respektive otáček tmelky, bylo realizováno měření, jak při zapnutém, tak i vypnutém kyvu. Z měření otáček tmelky  $n_{31}$  s měnící se excentricitou a vypnutém kyvu byla sestrojena Tab. 3.



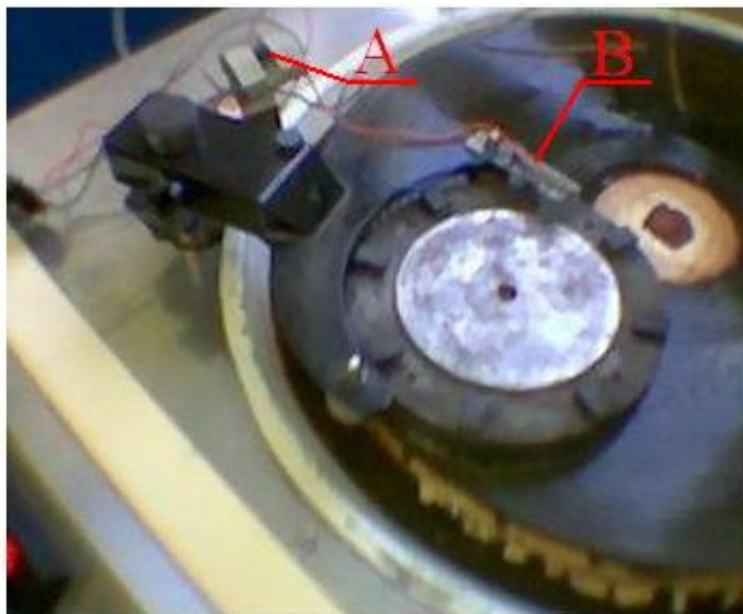
Obr. 27 - Schéma obvodu měření otáček  $n_{31}$

Po odměření otáček  $n_{31}$  s měřícím obvodem (Obr. 27) byl kyv stroje zapnut, čímž byly orientačně zmapovány otáčky  $n_{36}$ . Během tohoto pokusu se ukázalo, že měření s jedním přerušovačem zaznamenává výrazné změny naměřených hodnot, což prokázalo očekávanou proměnnost těchto otáček  $n_{36}$ . Z naměřených maximálních a minimálních hodnot otáček tmelky při zapnutém kyvu a známých otáčkách kotouče byla sestrojena Tab. 4.

Otáčky kotouče $n_{21}$ [ot·s <sup>-1</sup> ]		0,688	0,805	0,922	1,039	1,164	1,288
Otáčky tmelky $n_{36}$ [ot·s <sup>-1</sup> ]	min.	0,500	0,633	0,754	0,856	0,971	1,104
	max.	0,690	0,811	1,014	1,064	1,207	1,358

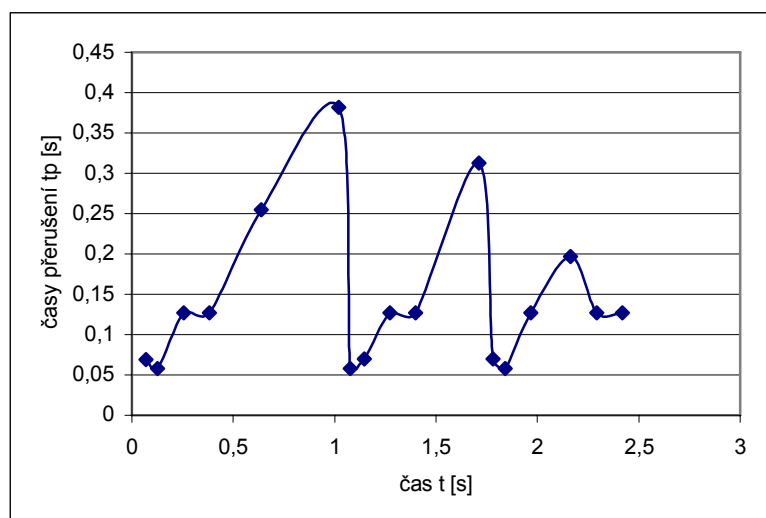
Tab. 4 - Měření jedním přerušením (kyv byl zapnut)

Přesnější změření otáček tmelky  $n_{36}$  při zapnutém kyvu bylo realizováno pomocí obvodu, který je znázorněn na Obr. 28, tento obvod měl dva jazýčkové kontaktní snímače A a B.



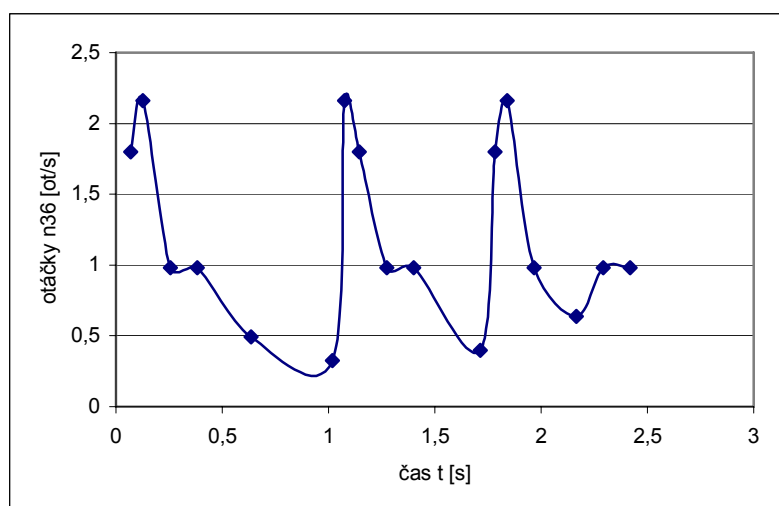
Obr. 28 - Schéma měřicího obvodu otáček  $n_{36}$

Snímač A spínal v mezní poloze kyvu, čímž měřil dobu kyvu. Snímač B snímal dobu mezi jednotlivými přerušeními. Tato přerušení byla realizována pomocí 8 magnetů, které byly rovnoměrně přilepeny po obvodu tmelky. Takto umístěné snímače na brousicím stroji byly připojeny pomocí USB kabelu k notebooku. Programem (Příloha č. 7) byly snímány hodnoty z čidel A a B a zapisovány v čase  $t$  do souboru.



Graf 8 - Závislost jednotlivých časů přerušení  $t_p$  v čase  $t$

Snímání pulsů bylo v programu ošetřeno proti zákmitům čidel. V průběhu měření se opět ukázalo, že otáčení tmelky při zapnutém kyvu bylo při otáčkách kotouče menších než  $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$  značně proměnné (proměnnost otáček bylo možno pozorovat pouhým okem). Z takto naměřených hodnot bylo možno sestavit závislost časů přerušení  $t_p$  mezi jednotlivými pulzy a časem  $t$ , viz Graf. 8 (při otáčkách kotouče  $n_{21} = 1,288 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ).



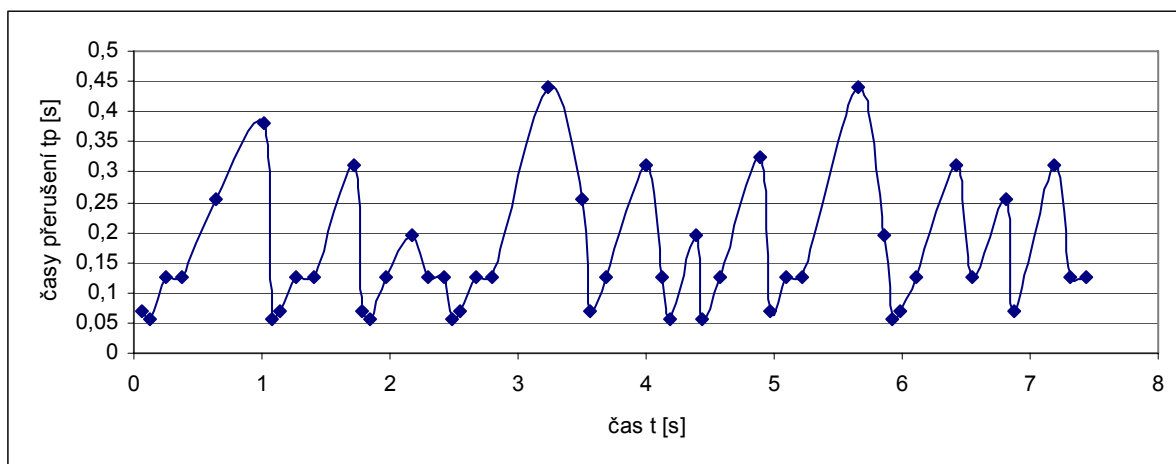
**Graf 9 - Závislost otáček tmelky  $n_{36}$  v čase  $t$**

Dále bylo možno stanovit závislost otáček tmelky  $n_{36}$  v čase  $t$ , viz. Graf 9. Uvedené grafy jsou z měření pohybů tmelky během jednoho kyvu. Z grafu jednotlivých přerušení (Graf 8) je patrná výrazná změna doby přerušení  $t_p$  mezi jednotlivými pulzy. Zároveň je možno si povšimnout v Grafu 8 změn otáček  $n_{36}$ . Dalším faktorem této problematiky je pohled na záznam pohybu tmelky  $n_{36}$ , který odpovídá třem kyvům (Graf 9).

1 kyv	0,00 - 2,40 s
2 kyv	2,42 - 4,89 s
3 kyv	4,89 - 7,44 s

Pohledem na Graf 9 lze zjistit jakousi opakující se sérii snižujících se změn jednotlivých přerušení  $t_p$  v čase  $t$ . Záměrně byla vybrána tato závislost a ne závislost otáček tmelky  $n_{36}$  v čase  $t$ , jelikož u otáček není patrná podobnost mezi jednotlivými kyvy. Křivka, která by nahrazovala toto měření, by značně zkomplikovala náročnost výpočtu a její modelování by nebylo příliš přesné vzhledem k tak malému počtu pulsů.

Značné poklesy v otáčkách tmelky  $n_{36}$  jistě způsobují výrazné změny v procesu broušení. Bohužel v současnosti nelze s určitostí stanovit, do jaké míry jsou tyto změny nežádoucí. Nicméně firmy zabývající se výrobou podobných brousících strojů [11], [12] používají nuceně hnanou tmelku a dosahují při výrobě vyšších kvalit drsnosti povrchu.



**Graf 10 - Závislost časů přerušení  $t_p$  v čase  $t$  ( $n_{21} = 1,28 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , tři kyvy)**

## 7 Měření úběru materiálu

Při obrábění monokrystalu brusným kotoučem dochází ke styku brusného kotouče se zrnky karbidu boru, které jsou zároveň ve styku s obrobkem. Pro výrobu je důležitá produktivita práce při broušení, kterou lze charakterizovat množstvím odebraného materiálu.

Měřením byly zmapovány závislosti úběru materiálu obrobku na změně relativní rychlosti a na změně měrného tlaku. Toto měření bylo provedeno za konstantního nastavení stroje, a při zapnutém kyvu.

Úběr materiálu byl stanoven jako

$$U = K_K \cdot K_B \cdot v^a \cdot p^b, \quad (32)$$

kde

$K_K$ ..... součinitel charakterizující materiál kotouče,

$K_B$ ..... součinitel charakterizující brusivo,

$v$ ..... rychlost při obrábění,

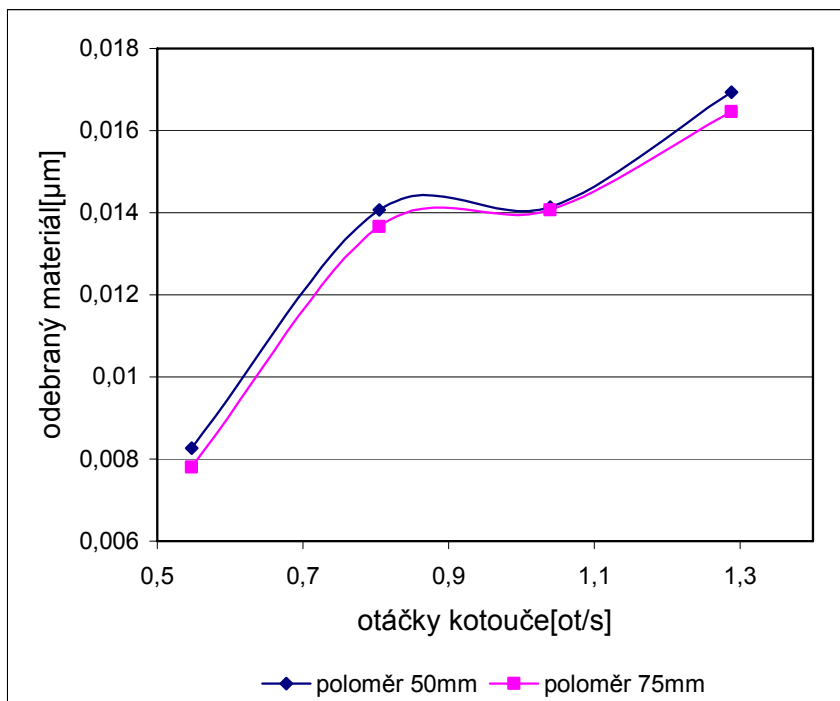
$p$ ..... měrný tlak,

$a, b$ ..... empiricky zjištěné koeficienty. [5]

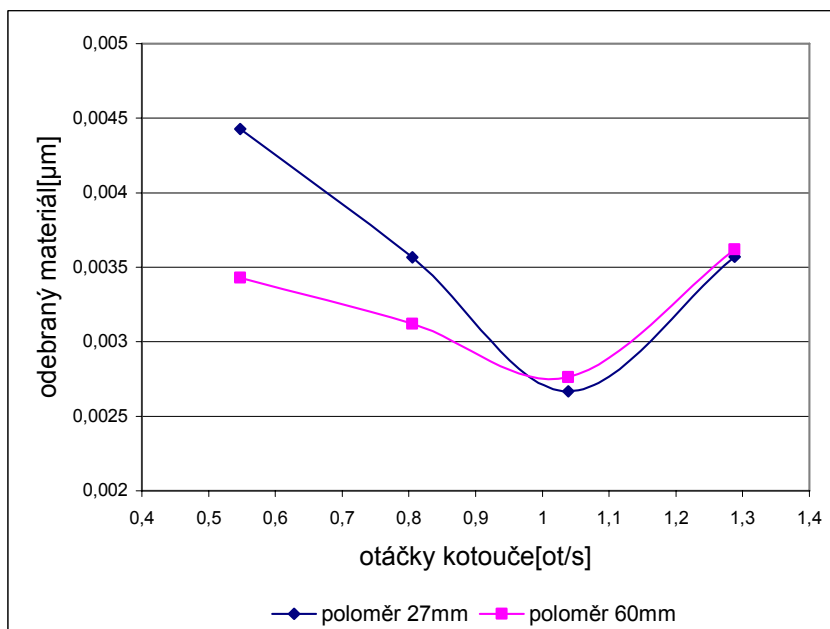
Při měření úběru materiálu byl použit stroj s čtyřkloubovým mechanismem s plynulou regulací otáček, který je v současnosti využíván k broušení scintilátorů. V následujících grafech pořízených z měření je patrné, že úběr materiálu krystalických látek není lineární funkcí. Je zřejmé, že dané měření postihlo jen část průběhu odebrání materiálu v závislosti na měnícím se tlaku a rychlosti. Toto měření bylo omezeno uchycením tmelky v kyvném rameni a přidavnou zátěží, pro kterou byly využity nepoužívané tmelky ve výrobě, které na sebe nebyli během měření pevně přidělány. Ve vyšších rychlostech kotouče a nevhodném nastavení krajní polohy kyvného ramene hrozilo odpoutání tmelky od rolniček kyvného ramene a následné vymrštění mimo brusný kotouč.

Při porovnání charakteristik úběru materiálu (Graf 11 a 12) v závislosti na otáčkách kotouče si lze povšimnout, že naměřená závislost průběhu úběru materiálu u YAPu a křemene vykazuje jistou identitu. Lze spekulovat zda-li při zvýšení rozsahu otáček kotouče u YAPu během

měření bude mít za následek dosažení podobného tvaru charakteristiky YAPu jako má křemen nebo dojde k zjištění, že úběr materiálu při vyšších a nižších otáčkách pouze vzrůstá bez patrných prodlev.

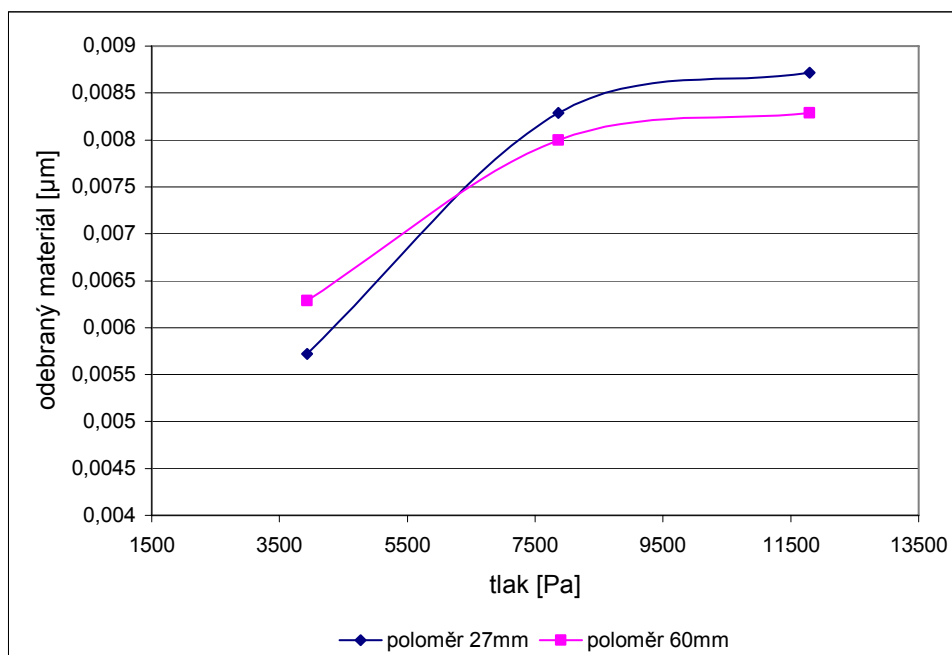


**Graf 11 - Závislost odebraného materiálu na otáčkách kotouče pro křemen**



**Graf 12 - Závislost odebraného materiálu na otáčkách kotouče pro YAP**

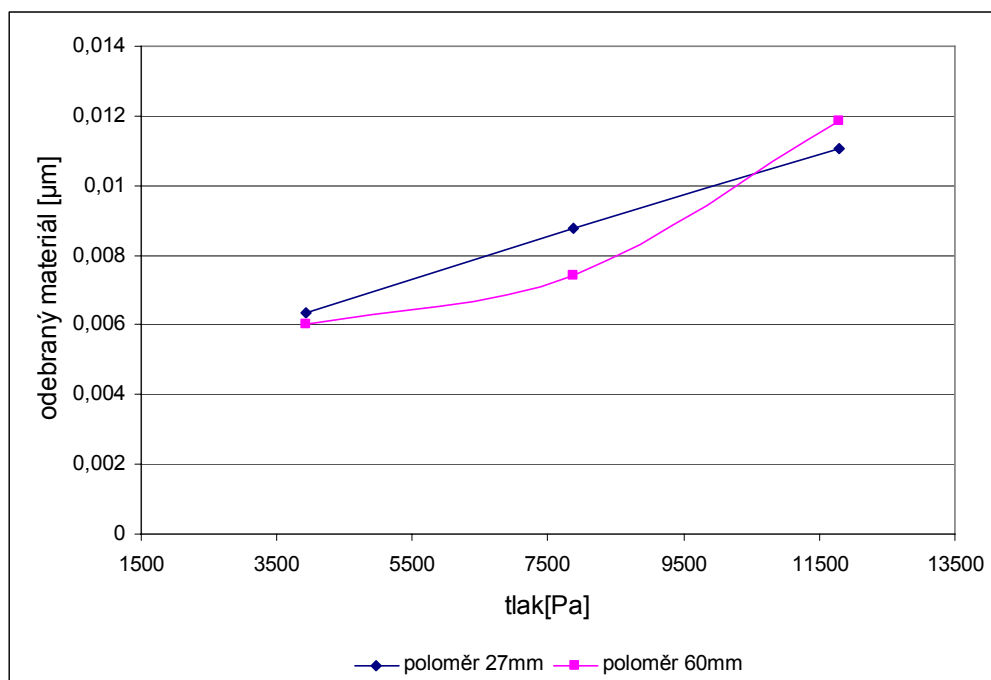
Následující grafy popisují naměřenou závislost úběru materiálu při změně tlaku. Jak již bylo uvedeno, zvýšení tlaku bylo omezeno nestabilitou zatěžujících tmelek, přesto je z Grafu 13 zřejmé, že při zvyšování tlaku dojde k zvyšování úběru materiálu. Dále z Grafu 13 je patrné, že jakmile množství odebíraného materiálu dosáhne jisté úrovně, nebude zřejmě již docházet k jeho dalšímu nárůstu. Otázkou je, zda-li nedojde k rozdrčení zrn brusiva karbidu boru při zvýšení tlaku a tím i ke snížení odebíraného materiálu.



**Graf 13 - Závislost odebraného materiálu na vzrůstajícím tlaku ( $n_{21} = 0,0547 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $n_{41} = 0,9 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ )**

V grafu 14 je též zachycena závislost odebraného materiálu na vzrůstajícím tlaku při stejných podmínkách, jaké byly při měření, které je zobrazeno v Grafu 13, s tím rozdílem, že v tomto případě (Graf 14) byly nastaveny vyšší otáčky brusného kotouče. Z Grafu 14 je patrné, že pro vyšší otáčky kotouče tato závislost nenabude hodnoty v níž se ustálí množství odebíraného materiálu, ale bude nejspíše dále narůstat.



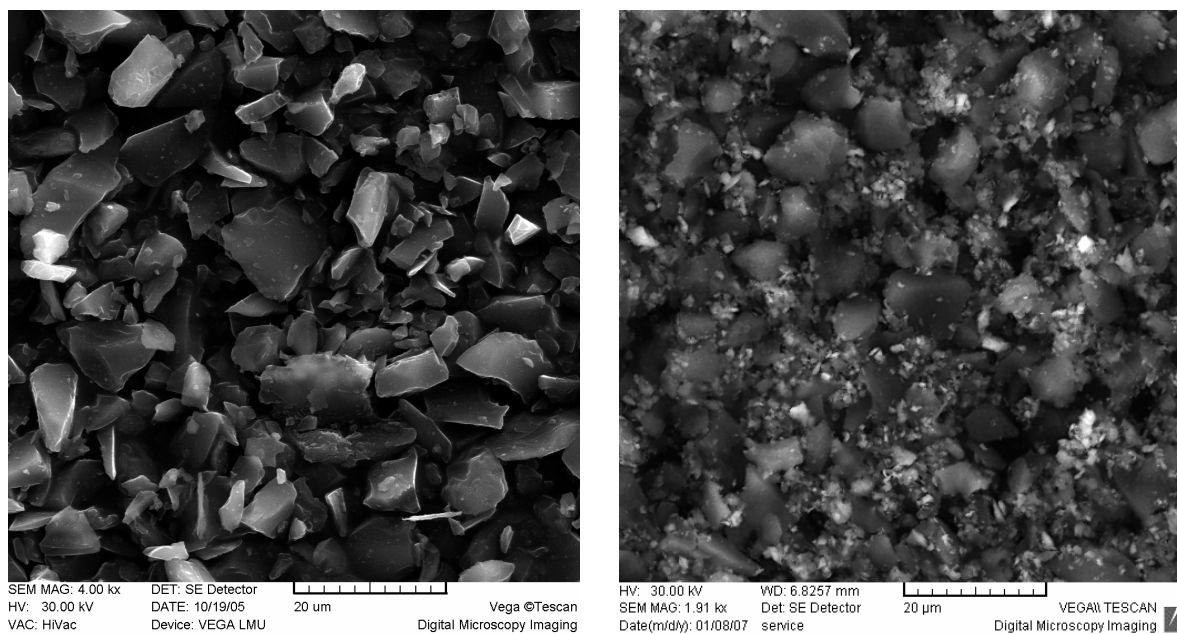


**Graf 14 - Závislost odebraného materiálu na vzrůstajícím tlaku ( $n_{21} = 0,805 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n_{41} = 0,9 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ )**

Jak již bylo zmíněno, je otázkou, zda-li nedochází k drcení zrn brusiva<sup>5</sup> při broušení a pakliže ano, tak do jaké míry? Pro zodpovězení této otázky byl proveden odběr brusiva po broušení (Obr. 28), které bylo následně analyzováno.

Na fotografii použitého brusiva, viz Obr. 28, je vidět mnoho nepatrných částek okolo velkých krystalů karbidu boru. Úvaha, že velké krystaly na fotografiích jsou zrna brusiva karbidu boru, byla intuitivně potvrzena díky srovnání s fotografií samotného, nepoužitého brusiva karbidu boru o zrnitosti 1000. Lze tedy pouze spekulovat, zda-li malé částčky obklopujících zrna karbidu boru jsou odpadovými částmi broušeného krystalu nebo zda-li jde o třísky z brusného kotouče a nebo zda-li se nejedná o rozdrcené krystaly karbidu boru. Původ světlejších zrn by bylo možno přisoudit obrusu krystalu YAPu, který byl při pokusu obráběn, poněvadž při pohledu na fotografii YAPu (Obr. 1a-b) je vidět, že povrch YAPu je velice světlý, tudíž lze tyto částčky předběžně prohlásit za částčky YAPu. Nad zbylými částčkami lze pouze spekulovat, jak velké množství z nich odpovídá rozdrcenému karbidu boru a jak velké množství připadá na odebraný materiál z litinového kotouče.

<sup>5</sup> Karbid boru s tvrdostí 45GPa je třetí nejtvrdší průmyslově vyrobená látka za diamantem (100GPa) a karbidem nitridu boru (76GPa); Brožek, V., Hofman, R., Ctibor, P. Plazmochemická Syntéza karbidu boru. Chemické listy, 2002, 96, roč. 96, č.1-12, str. 364. ISSN 0009-2770.



**Obr. 29 – Brusivo před(vlevo) a po použití(vpravo) B<sub>4</sub>C - 1000**

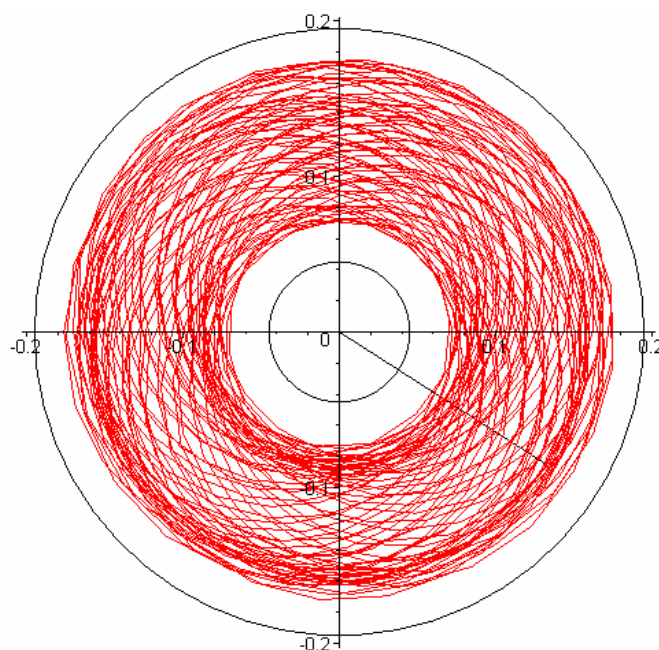
Podmínky měření:

Zrnitost brusiva	1 000
Doba broušení	1h 30min
Otáčky kotouče $n_{21}$	$0,5433 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$
Otáčky tmelky $n_{36}$	volně se otáčející tmelka
Kyv stroje	zapnut
Hmotnost tmelky	2,7 kg (bez přídatné zátěže)
Materiál obrobků	YAP (rozměry dle Obr. 2)

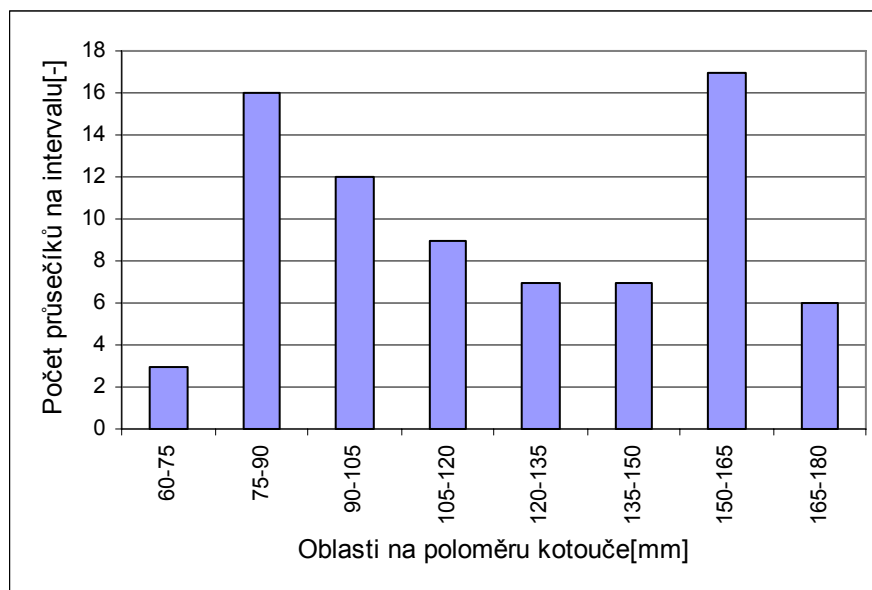
## 8 Návrh zpětné vazby

Pro vytvoření zpětné vazby mezi výpočty a broušením byla v pracích [1], [6] použita výhradně relativní rychlost mezi tmelkou a broušícím kotoučem. Zde v této práci bylo poukázáno na vliv trajektorií a v kapitole 3.6, str. 40 byl vysloven teorém pro posuzování opotřebení z obrazců vzniklých ze simulace trajektorie obecného bodu B tmelky po kotouči.

V následující části této kapitoly jsou uvedeny dva případy určování opotřebení v návaznosti na trajektorie a relativní rychlost. První případ (Obr. 29) znázorňuje obrazec vzniklý při simulaci s uvažováním záporné orientace natočení  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$  a otáček  $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$  a času simulace  $t = 90 \text{ s}$ . Druhý případ (Obr. 30) platí pro  $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,5 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$  a času simulace  $t = 90 \text{ s}$ , který se ukázal jako opticky vhodnější co do rozložení trajektorií. Tento případ byl nalezen po prostudování simulací, u kterých byly měněny otáčky tmelky  $n_{31}$ . U těchto dvou případů byla spočtena četnost průsečíků trajektorie bodu B s přímkou na zvolených intervalech, a to pro přímkou v počátku a třech zvolených směrech  $45^\circ$ ,  $135^\circ$  a  $225^\circ$ . Intervaly, na kterých byla vypočítávána četnost, byly stanoveny po 15 mm, což rozdělilo kotouč do soustředných kružnic. Takto spočtené četnosti byly vyneseny do grafů.

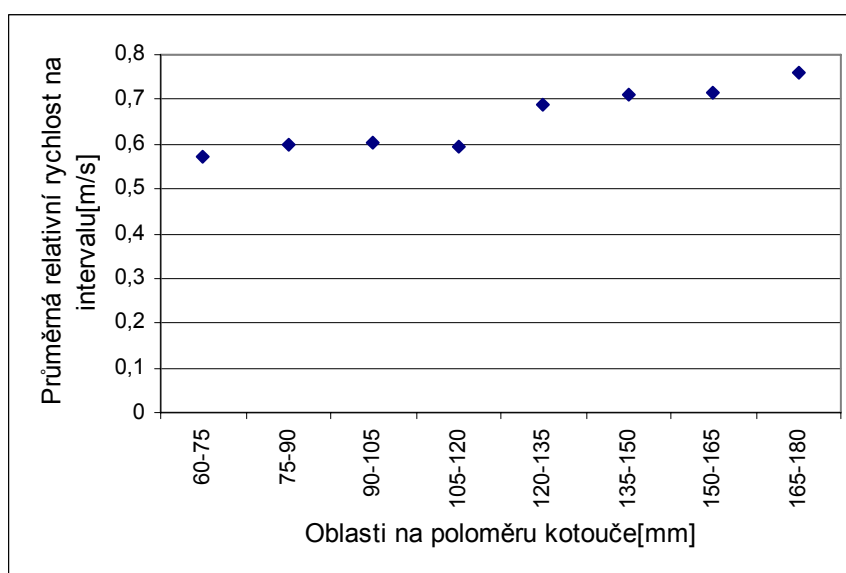


**Obr. 30 - Trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky vzhledem k brusnému kotouči  
( $t = 90 \text{ s}$ ,  $n_{21} = 0,847 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443 \text{ ot}\cdot\text{s}^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**



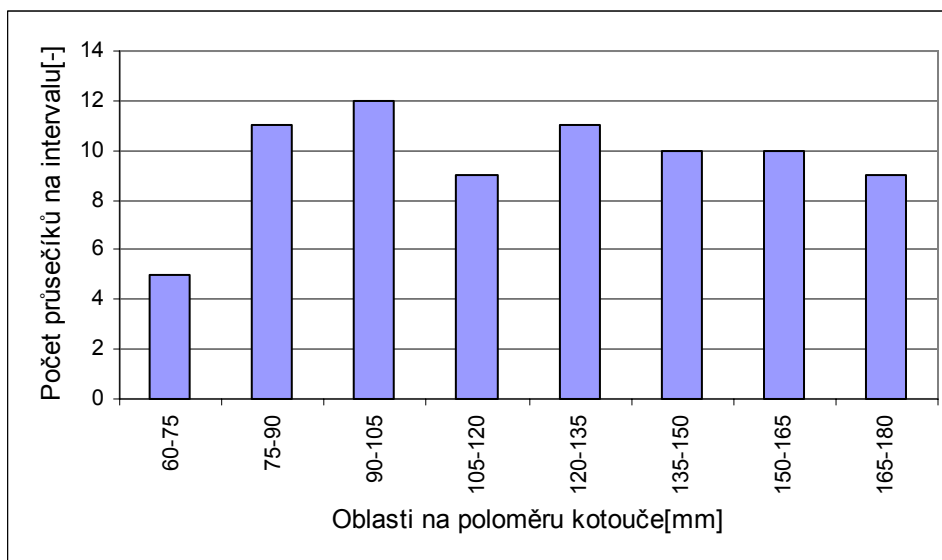
**Graf 15 - Závislost četnosti průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v počátku na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot $\cdot$ s $^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443$  ot $\cdot$ s $^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**

Pro představu, jak se podílí relativní rychlost  $v_{23}$  na opotřebení v takovýchto intervalech, byla spočtena průměrná hodnota její velikosti na daných intervalech. Z těchto hodnot byly též sestaveny grafy, čímž vznikl přehled o četnosti trajektorií a hodnotách průměrné relativní rychlosti na daných intervalech.

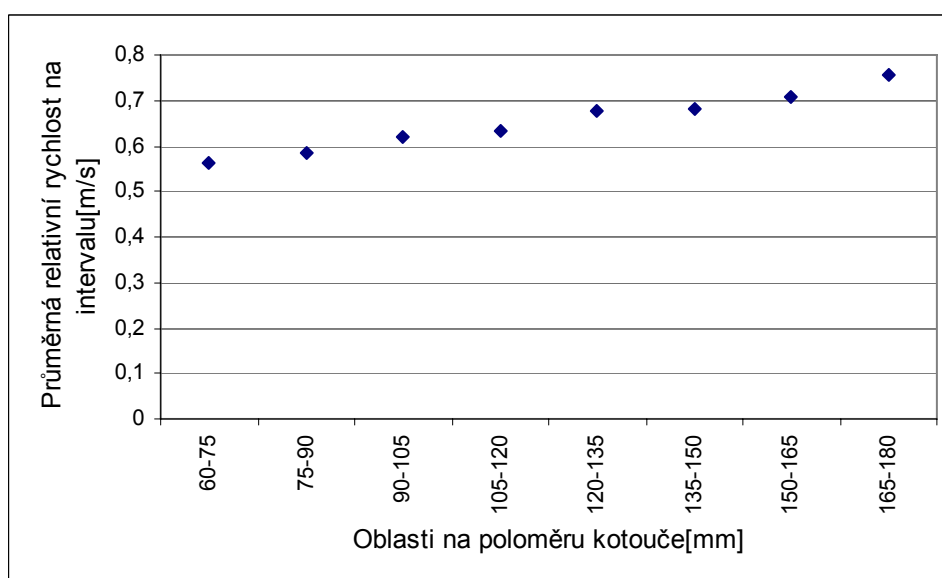


**Graf 16 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot $\cdot$ s $^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443$  ot $\cdot$ s $^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímka v počátku)**

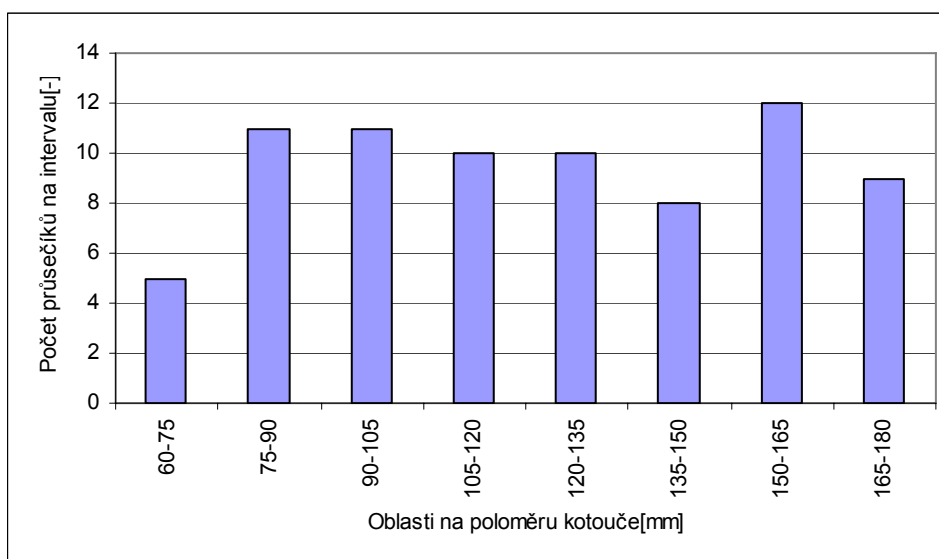
U případu, který je znázorněn na Obr. 29, se po výpočtu četností potvrdilo, že opotřebení v počátku a pod 225 stupni bude dosahovat ve středu a na okraji kotouče vyšších hodnot, jak je patrné z Grafu 15, přičemž u hodnot velikosti relativní rychlostí  $v_{23}$  lze mluvit o nárůstu v daném směru.



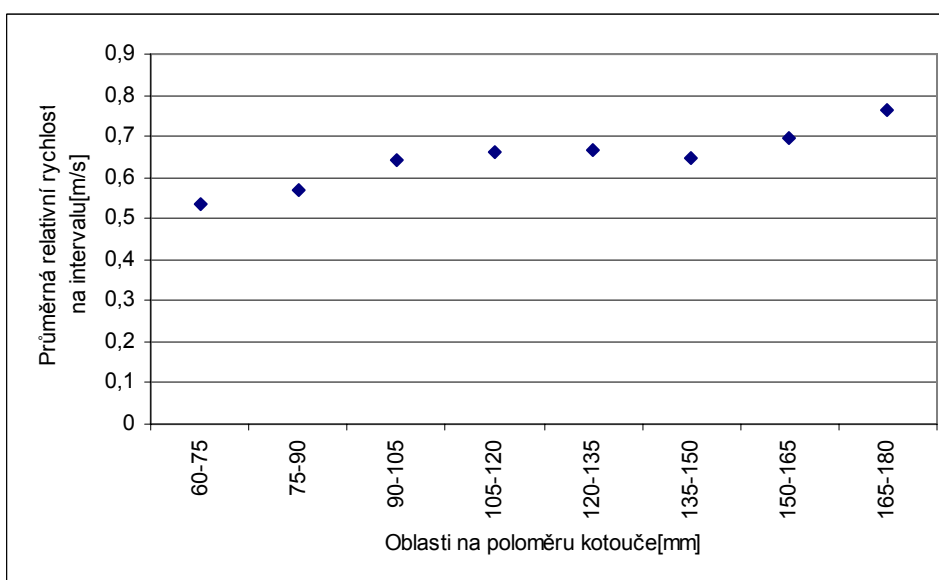
**Graf 17 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v  $45^\circ$  na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**



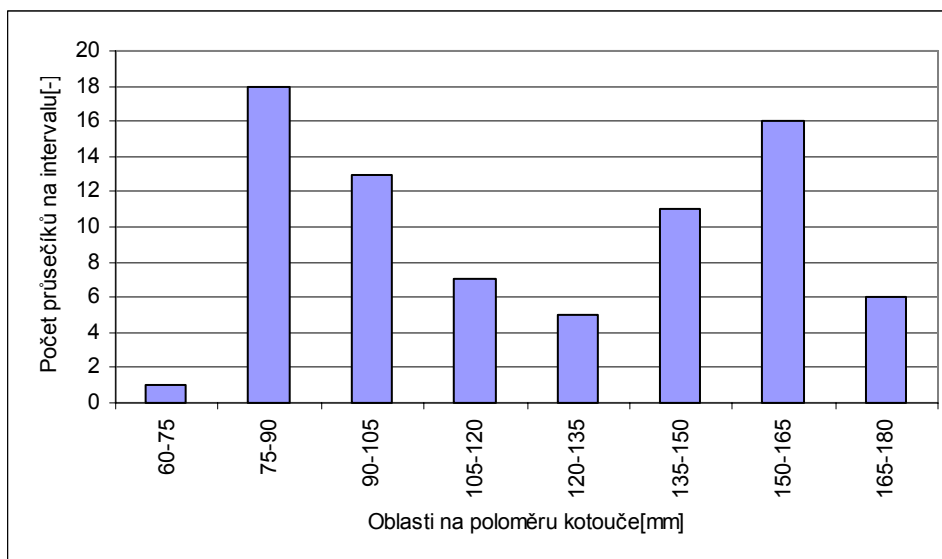
**Graf 18 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443 \text{ ot} \cdot \text{s}^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímka v  $45^\circ$ )**



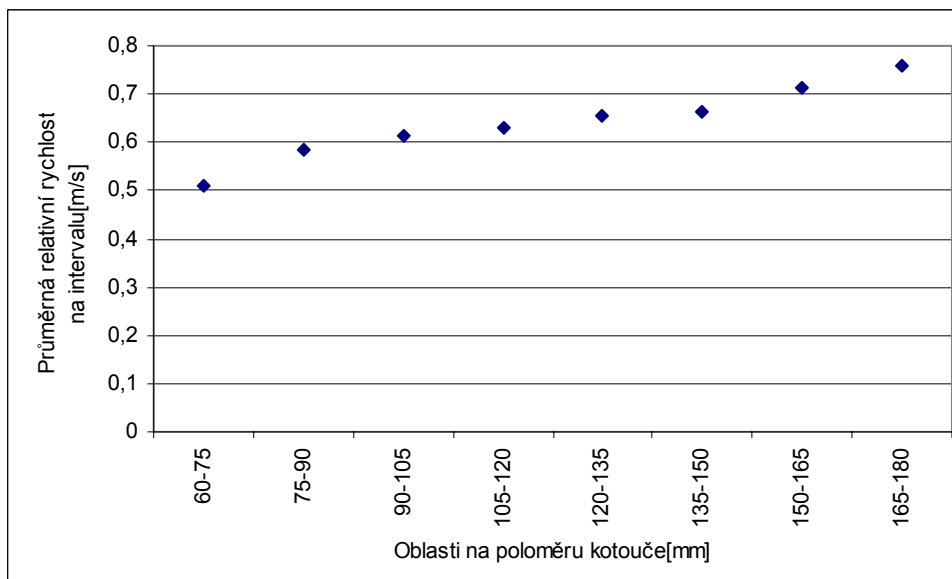
**Graf 19 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v  $135^\circ$  na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s $^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443$  ot·s $^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**



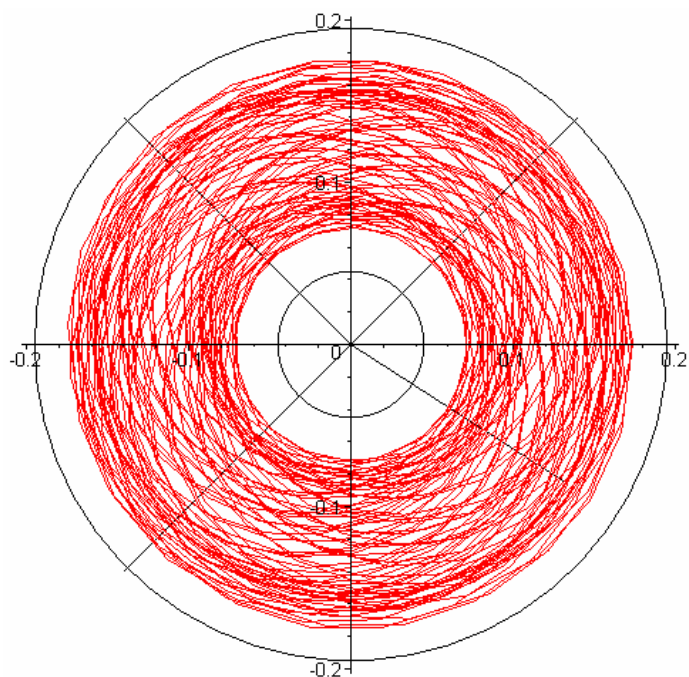
**Graf 20 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s $^{-1}$ ,  $n_{31} = 0,58443$  ot·s $^{-1}$ , záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímkou v  $135^\circ$ )**



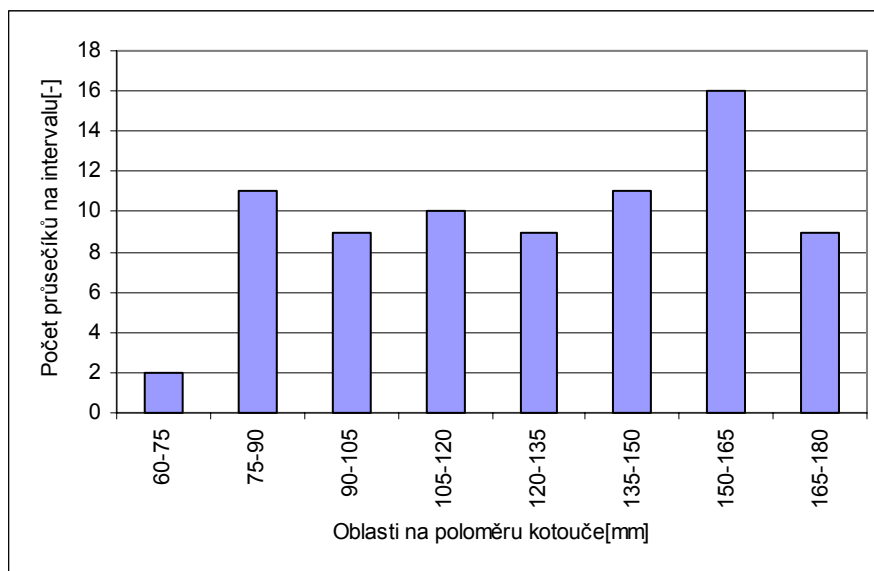
**Graf 21 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v  $225^\circ$  na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,58443$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**



**Graf 22 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,58443$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímkou v  $225^\circ$ )**

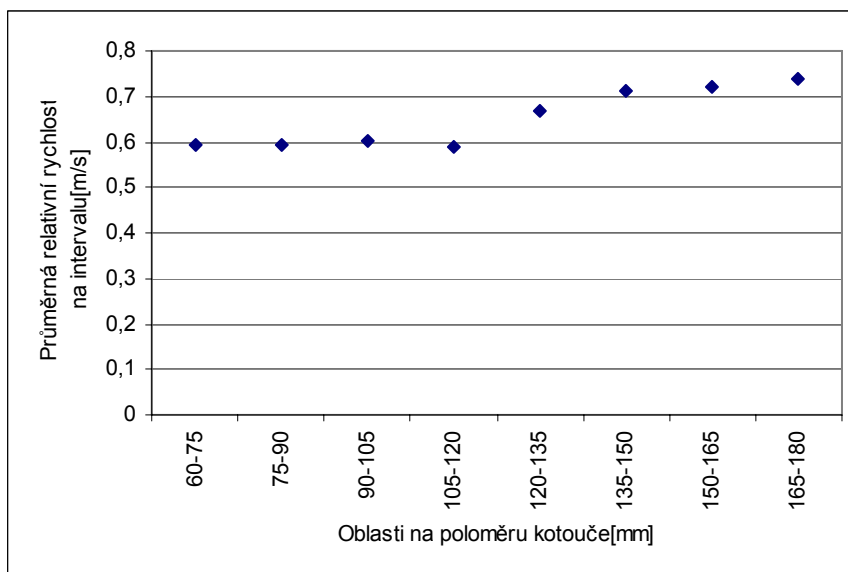


**Obr. 31 - Trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky vzhledem k brusnému kotouči  
( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**

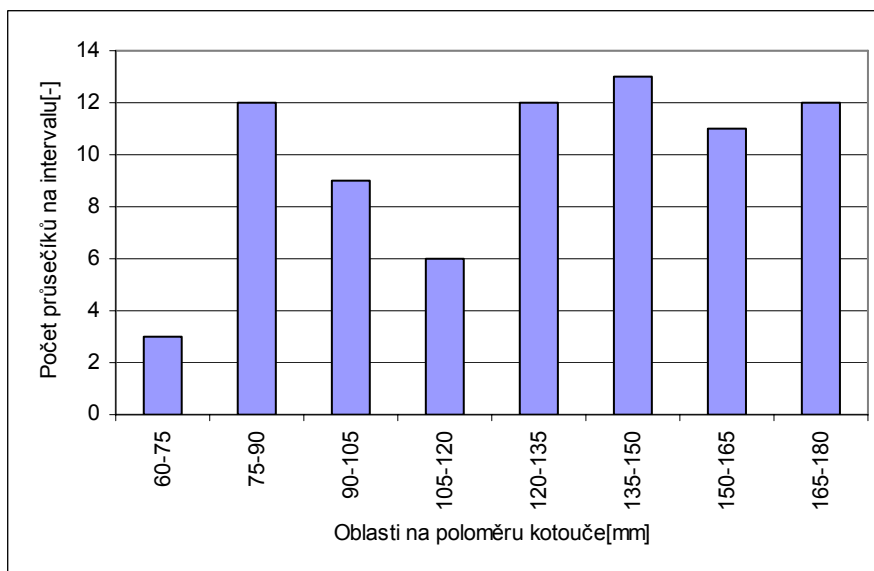


**Graf 23 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v počátku na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**

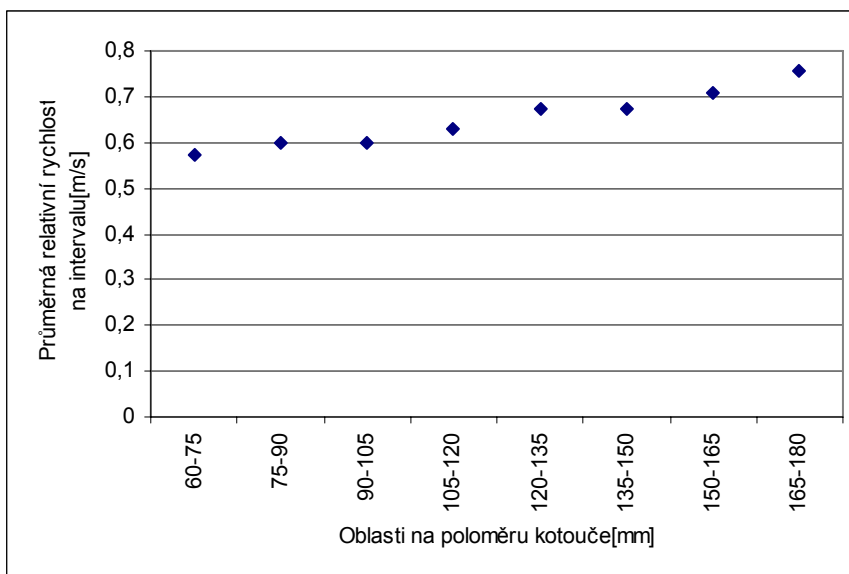




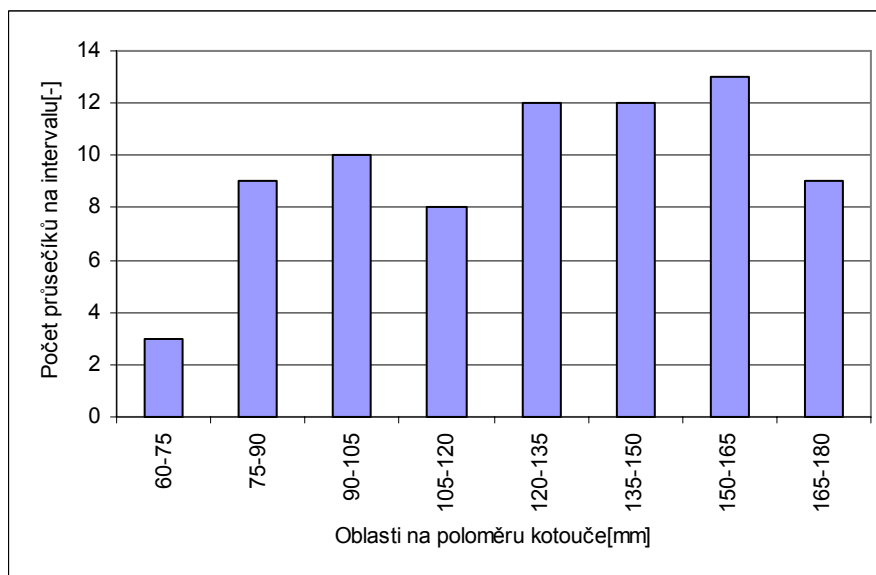
**Graf 24 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech**  
 ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímka v počátku)



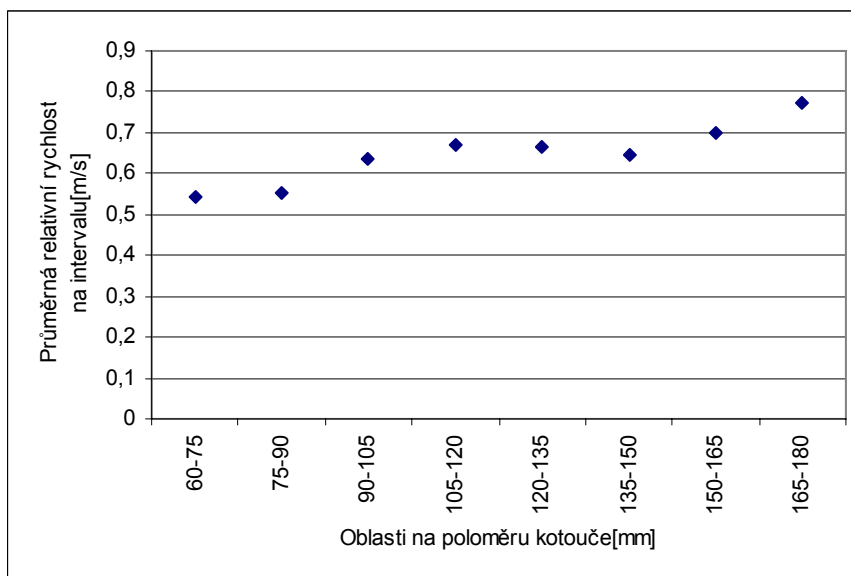
**Graf 25 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v 45° na intervalech** ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )



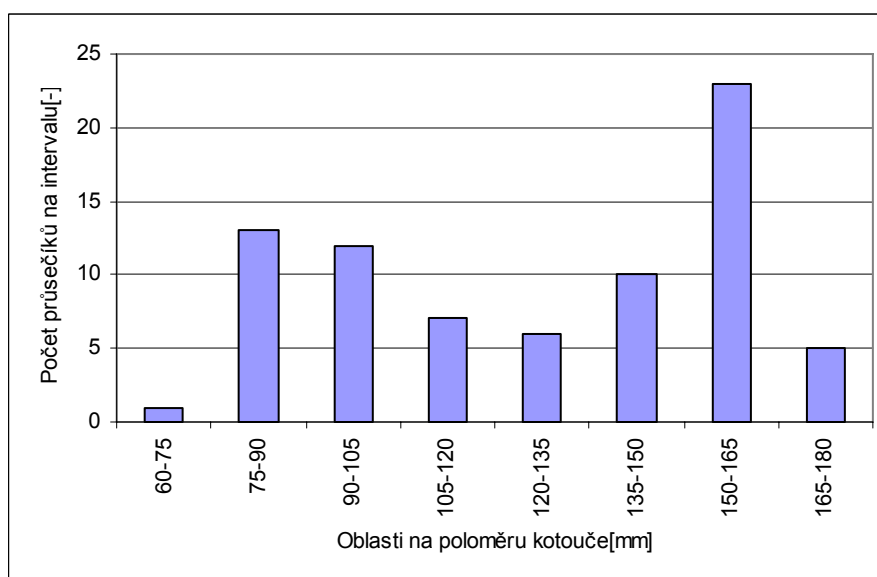
**Graf 26 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech**  
 ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímka v 45°)



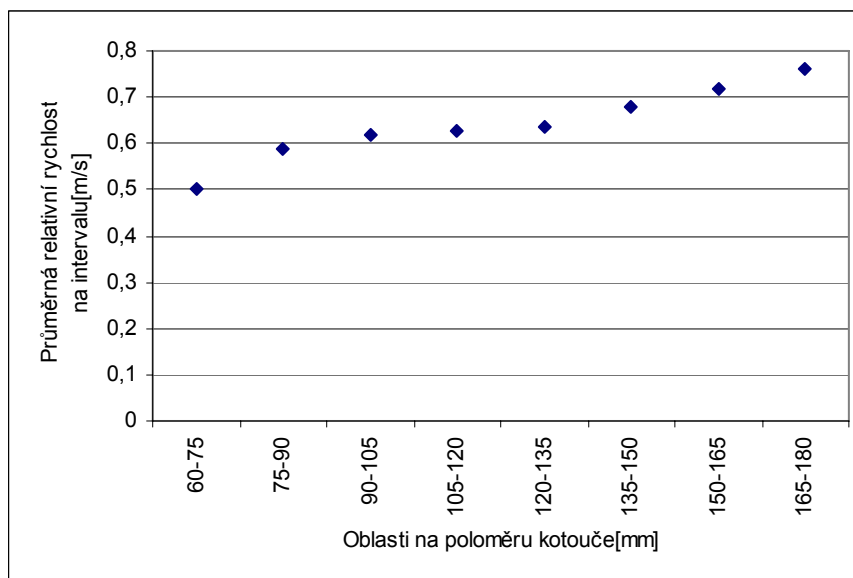
**Graf 27 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v 135°**  
 na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )



**Graf 28 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech**  
 ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímka v 135°)

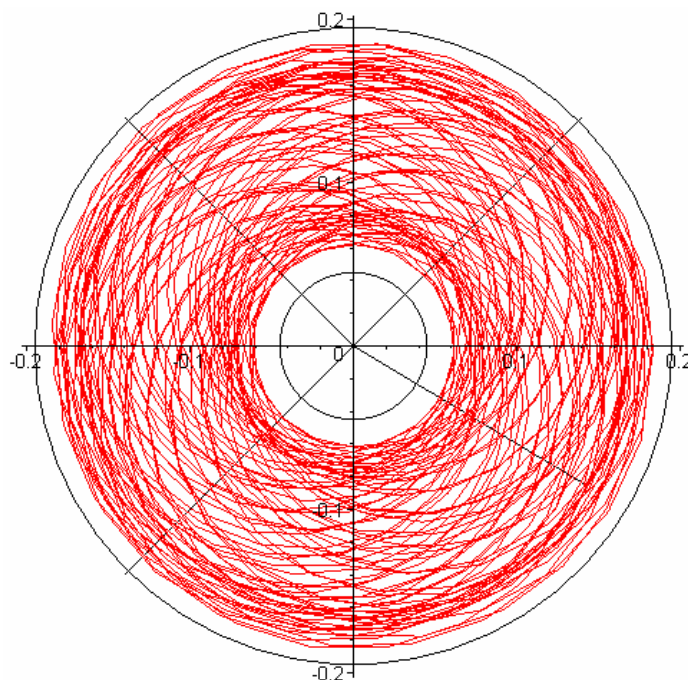


**Graf 29 - Závislost četností průsečíků trajektorie relativního pohybu bodu B tmelky s přímkou v 225°**  
 na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )



**Graf 30 - Závislost hodnot průměrné relativní rychlosti na intervalech ( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ , přímka v 225°)**

Po prostudování grafů četností průsečíků trajektorie vzájemného pohybu bodu B tmelky s přímkou u (druhého) případu, kdy se tmelka otáčí  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>, je vidět, že grafy zobrazují vcelku uspokojivé rozprostření. Avšak u Grafu 29 dochází k velice výraznému nárůstu četností na intervalu 150 až 165 mm, což je dosti nepříjemné. Tohoto nárůstu by se dalo zbavit tím, že by obrobky byly natmeleny dále od středu tmelky a tak by se tento nárůst zmenšil, viz Obr. 31.



**Obr. 32 - Vliv změny umístění obrobků na rozložení trajektorií relativního pohybu bodu B tmelky  
vzhledem k brusnému kotouči  
( $t = 90$  s,  $n_{21} = 0,847$  ot·s<sup>-1</sup>,  $n_{31} = 0,5$  ot·s<sup>-1</sup>,  $x_{3B} = 54$  mm, záporná orientace  $\kappa(t)$ ,  $\tau(t)$ )**

Stinnou stránkou určování opotřebení z trajektorií je určení průsečíků křivky a přímky. Při mechanizaci výpočtu v softwarovém prostředí Maple vychází odlišná řešení od směru přímky o  $\pi$ , ale také vycházejí jiná řešení, kterých je velice málo, přesto dokáží výběr řešení zkomplikovat.

Ukázka mechanizace při hledání průsečíků křivky a přímky v softwarovém prostředí Maple:

```
> for i from 1 to 50 do
t:=t+0.1;
x[i]:=fsolve(y2b(tt)/x2b(tt)-evalf(y2b(0)/x2b(0)),tt=t);
if x[i]<>x[i-1] then
yy[ii]:=x[i];
ii:=ii+1;
print(x[i]);
end if;
end do;
```

-0.671661396510<sup>-10</sup>

0.6751845863

1.238658435

1.738574779

2.443260036

3.022213557

3.528549588

Doposavad nebyla uvedena zmínka o vlivu relativní rychlosti na opotřebení, protože ze získaných dat, viz Graf 15 – 30, lze hovořit o nárůstu rychlosti v jakémsi směru. Z grafů průměrné relativní rychlosti na intervalech není zřejmé, že by docházelo k výrazným změnám a tudíž lze předpokládat, že největší vliv na opotřebení bude mít četnost průsečíků.

Aby bylo možno potvrdit, či vyvrátit vhodnost tohoto postupu posuzování opotřebení, byl navržen přístroj pro měření povrchu kotouče (příloha sestava). Ukázalo se, že náklady na jeho realizaci by byly dosti vysoké a potřebná přesnost vzhledem k úchytkám měřidla by nemusela být dostačující. Toto měření by mohlo být realizováno s příslušnou přesností u externí firmy, což by vyžadovalo dosti vysoké finanční prostředky.

## 9 Závěr

Nalezením odpovědi na otázku, jak nejlépe obrábět monokrystalické látky, se již zabývalo více autorů. Dalším zkoumáním stále získáváme vědomosti o tom, k čemu dochází při broušení a které parametry nelze opomenout při řešení.

Bližším zkoumáním a měřením byly zmapovány otáčky tmelky jak pro vypnutý, tak pro zapnutý kyv. Tato měření posloužila k návrhu otáček do matematických modelů popisujících broušení. Při měřeních bylo odebráno brusivo z místa broušení a byla vyhotovena fotografie pomocí elektronového mikroskopu. Z fotografie použitého brusiva bylo prokázáno, že dochází k drcení brusiva.

Měřením úběru materiálu monokrystalu při broušení byly sestrojeny grafy, z kterých lze posuzovat produktivitu broušení v závislosti na rychlosti a přítlaku na tmelku. Pro stanovení zpětné vazby mezi matematickým modelem a výrobou bylo navrženo konstrukční řešení měřicího zařízení pro měření stavu povrchu brusného kotouče po broušení.

Naměřené změny pohybu tmelky jistě ovlivňují i odběr materiálu z obou ploch, a to jak brusného kotouče, tak monokrystalu. V současnosti již víme, jakých hodnot rychlostí může obecný bod tmelky dosahovat, ovšem pouze pro předepsaný pohyb tmelky. Simulace volného pohybu z naměřených dat není snadná a matematická aproximace tohoto pohybu by byla příliš komplikovaná, jelikož by se musel sestrojit interval, který by statisticky zahrnul celek a zároveň by se periodicky opakoval. Toto nemohlo být prakticky uděláno, protože měření, které bylo navrženo, uskutečněno a z kterého se vycházelo v této práci, mělo malý počet pulsů.

Volný pohyb tmelky díky své nereprodukovatelnosti velice komplikuje měření, z kterých by bylo možno určit dosahované opotřebení brusného kotouče. Výsledkem mé práce je návrh sestrojit zařízení, které uděluje tmelce nucený pohyb, případně pomocí takového zařízení realizovat řízené přibrzdění či zrychlení tmelky v úvratích kyvu.

Vhodnost této varianty řešení je prokazatelná, až vlastním sestrojením zařízení udělujícího nucený pohyb tmelce a jejího odzkoušení v praxi. Ukazuje se, že firmy používající nucený pohyb tmelky dosahují vyšších kvalit drsností povrchů obrobků. Což také potvrzuje myšlenku sestrojení či zakoupení zařízení pro nucený pohyb tmelky.

## 10 Seznam použité literatury

### **Tištěné zdroje:**

- [1] Baudyš, A. Kinematika strojů pro broušení a leštění rovinných optických ploch. Praha: České vysoké učení technické, 1980
- [2] Brát, V. Jáč, V. Rosenberg, J. Kinematika. 1. vydání. Praha: SNTL, 1987
- [3] Brožek, V., Hofman, R., Ctibor, P. Plazmochemická Syntéza karbidu boru. Chemické listy, 2002, 96, roč. 96, č.1-12, str. 364. ISSN 0009-2770.
- [4] Götz, Jiří. Broušení a leštění skla. 1. vyd. Praha: SNTL, 1963.
- [5] Línek, A., Žemlička, J. aj. Kurs o opracování krystalů a křehkých materiálů. 1.vydání. Ústí nad Labem: Dům techniky ČSVTS, 1984
- [6] Novák, T. Rovinnost obráběcího kotouče brousícího mechanismu k broušení a lapování skla a monokrystalů různých polodrahokamů. Liberec: Technická univerzita v Liberci; Fakulta strojní; Katedra mechaniky, pružnosti a pevnosti, diplomová práce, 2003.
- [7] Vrzala, R. a Petříková, I. Brousící mechanismus – trajektorie a rychlosti některých bodů. Liberec, 2001.
- [8] Vrzala, R. a Petříková, I. Kinematické poměry při broušení čelními stěnami rotujících třecích kotoučů s rovnoběžnými osami. Liberec: Technická univerzita v Liberci; Fakulta strojní, Sborník semináře, 2005. ISBN 80-7083-999-6.
- [9] Vrzala, R. a Petříková, I. Přenos pohybu čelními stěnami třecích kotoučů s rovnoběžnými osami. Vědecká pojednání. Jubilejní sborník VIII/2002 Akademické koordinační středisko v Euroregionu Nisa. Liberec, Zittau, Jelenia Góra. Strana 358-362, ISBN 80-7083-628-8.



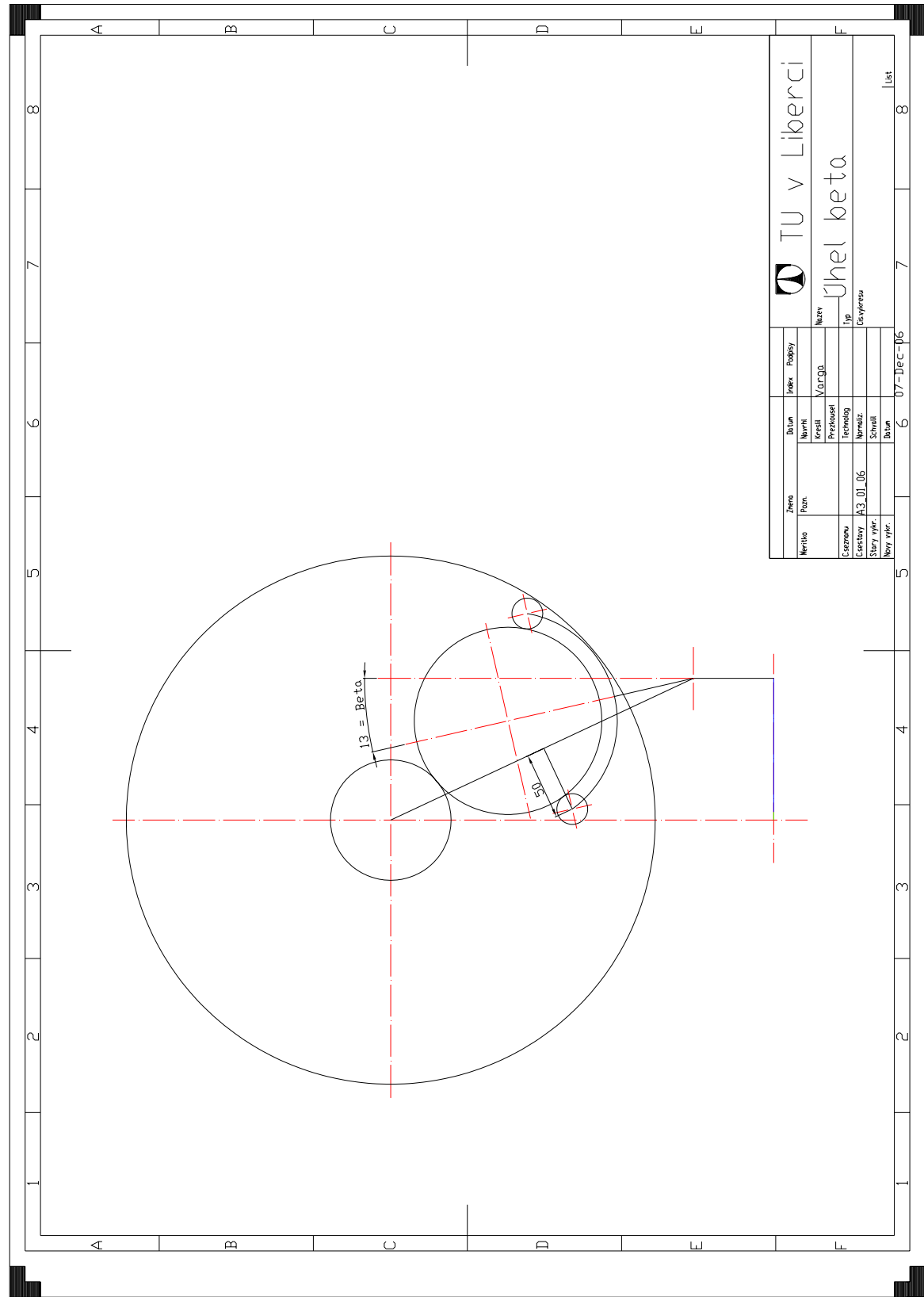
**Internetové zdroje:**

- [10] Hoderová, J. ÚM FSI v Brně [online]. [cit. 15.10.2006]. Dostupné na internetu:  
<[http://math.vutbr.cz/download.aspx?id\\_file=391](http://math.vutbr.cz/download.aspx?id_file=391)>
- [11] IBS [online]. [cit. 12.3.2007]. Dostupné na internetu:  
<<http://www.ibs-grafrath.de/>>
- [12] LAPMASTER [online]. [cit. 12.3.2007]. Dostupné na internetu:  
<<http://www.lapmaster.com/machinery/precision-optics-machinery/default.html>>

## 11 Seznam příloh

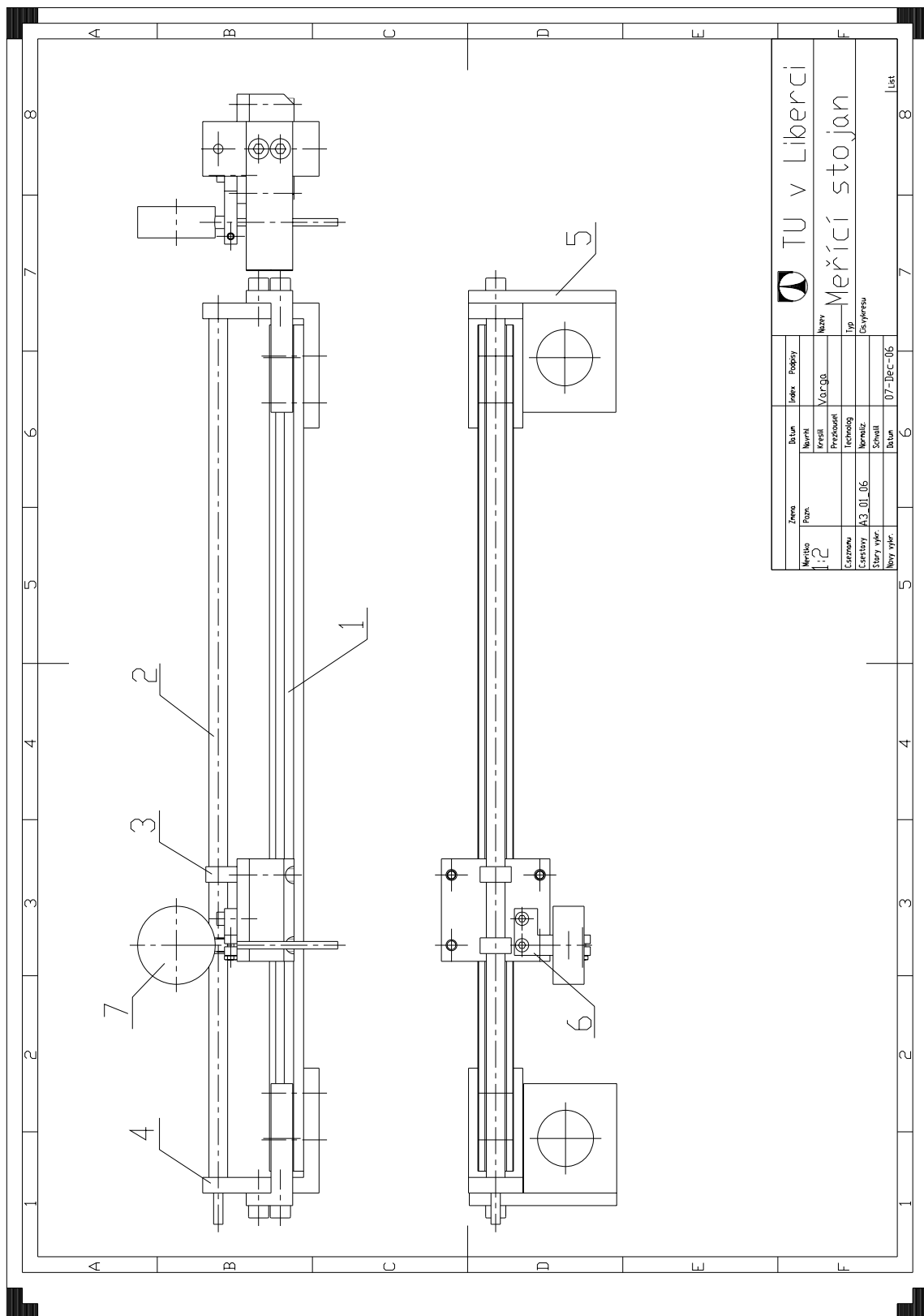
Příloha č. 1 - Měření úhlu beta	(1 strana)
Příloha č. 2 - Výkres měřicího zařízení	(1 strana)
Příloha č. 3 - Ukázka použitého programu pro simulaci trajektorie obecného bodu B tmelky v prostoru kotouče v softwarovém prostředí Maple	(2 strany)
Příloha č. 4 - Ukázka použitého programu pro výpočet trajektorie obecného bodu kotouče v prostoru tmelky v softwarovém prostředí Maple	(2 strany)
Příloha č. 5 - Ukázka použitého programu pro výpočet relativní rychlosti v softwarovém prostředí Maple	(2 strany)
Příloha č. 6 - Zrnitost brusiva karbidu boru	(1 strana)
Příloha č. 7 - Ukázka programu v Delphi	(2 strany)

Příloha č. 1 - Měření úhlu beta



Země		Index		Podpis	
Název		Datum		Měření	
Pozn.		Kvalita		Výřez	
Cizomoc		Technická		Název	
Stavby		Norma		Typ	
Nový výř.		Schvál.		Cisypřes	
Datum		07-Dec-06		Líst	

## Příloha č. 2 - Výkres měřícího zařízení



Příloha č. 3 - Ukázka použitého programu pro simulaci trajektorie obecného bodu B tmelky v prostoru kotouče v softwarovém prostředí Maple

```

> restart:with(linalg):with(plots):with(plottools):
> T12:=matrix(3,3,[[cos(kappa(t)),sin(kappa(t)),0],[sin(kappa(t)),cos(kappa(t)),0],[0,0,1]]):
> T13:=matrix(3,3,[[cos(tau(t)),sin(tau(t)),0],[sin(tau(t)),cos(tau(t)),0],[0,0,1]]):
> T16:=matrix(3,3,[[cos(-psi(t)),-sin(-psi(t)),0],[sin(-psi(t)),cos(-psi(t)),0],[0,0,1]]):
> T12T:=transpose(T12):
> dT12:=map(diff,T12,t):
> dT13:=map(diff,T13,t):
> dT16:=map(diff,T16,t):
> r16:=vector(3,[1,k,0]):
> r63:=vector(3,[-r*sin(beta),r*cos(beta),0]):
> r3B:=vector(3,[x3B,y3B,0]):
> r12:=vector(3,[0,n,0]):
> r1B:=evalm(r16+T16&*r63+T13&*r3B):
> r2B:=evalm(T12T&*(r16+T16&*r63+T13&*r3B-r12)):
> qx2b:=eval(r2B[1]):
> x2b:=unapply(qx2b,t):
> qy2b:=r2B[2]:
> y2b:=unapply(qy2b,t):
> ddy2b:=diff(y2b,t):
> dy2b:=t->ddy2b:
> psi:=t->arcsin((c^2-l^2-d^2-k^2-b^2+2*b*sin(phi(t))*1+2*b*cos(phi(t))*k)/(-sqrt((2*b*d*cos(phi(t))-2*d*k)^2+(2*b*d*sin(phi(t))-2*d*1)^2))-arctan((2*b*cos(phi(t))*d-2*k*d)/(-2*1*d+2*b*sin(phi(t))*d)):
> phi:=t->2*Pi*n4*t:
> tau:=t->2*Pi*nt*t:
> kappa:=t->2*Pi*nk*t:
> qdx2b:=diff(x2b(t),t):
> dx2b:=t->qdx2b:
> qdy2b:=diff(y2b(t),t):
> dy2b:=t->qdy2b:
Souřadnice středu tmelky.....x,y
> xxst:=t->1-cos(arcsin(1/2*(-c^2+l^2+d^2+k^2+b^2-2*b*sin(2*Pi*n4*t)*1-2*b*cos(2*Pi*n4*t)*k)/(b^2*d^2*cos(2*Pi*n4*t)^2-2*b*d^2*cos(2*Pi*n4*t)*k+d^2*k^2+b^2*d^2*sin(2*Pi*n4*t)^2-2*b*d^2*sin(2*Pi*n4*t)*1+d^2*1^2)^(1/2))+arctan((-b*cos(2*Pi*n4*t)+k)/(b*sin(2*Pi*n4*t)-1)))*r*sin(beta)+sin(arcsin(1/2*(-c^2+l^2+d^2+k^2+b^2-2*b*sin(2*Pi*n4*t)*1-2*b*cos(2*Pi*n4*t)*k)/(b^2*d^2*cos(2*Pi*n4*t)^2-2*b*d^2*cos(2*Pi*n4*t)*k+d^2*k^2+b^2*d^2*sin(2*Pi*n4*t)^2-

```

```

2*b*d^2*sin(2*Pi*n4*t)*l+d^2*l^2)^(1/2))+arctan((-
b*cos(2*Pi*n4*t)+k)/(b*sin(2*Pi*n4*t)-1)))*r*cos(beta):
> yyst:=t->k-n+sin(arcsin(1/2*(-c^2+l^2+d^2+k^2+b^2-
2*b*sin(2*Pi*n4*t)*l-
2*b*cos(2*Pi*n4*t)*k)/(b^2*d^2*cos(2*Pi*n4*t)^2-
2*b*d^2*cos(2*Pi*n4*t)*k+d^2*k^2+b^2*d^2*sin(2*Pi*n4*t)^2-
2*b*d^2*sin(2*Pi*n4*t)*l+d^2*l^2)^(1/2))+arctan((-
b*cos(2*Pi*n4*t)+k)/(b*sin(2*Pi*n4*t)-
1)))*r*sin(beta)+cos(arcsin(1/2*(-c^2+l^2+d^2+k^2+b^2-
2*b*sin(2*Pi*n4*t)*l-
2*b*cos(2*Pi*n4*t)*k)/(b^2*d^2*cos(2*Pi*n4*t)^2-
2*b*d^2*cos(2*Pi*n4*t)*k+d^2*k^2+b^2*d^2*sin(2*Pi*n4*t)^2-
2*b*d^2*sin(2*Pi*n4*t)*l+d^2*l^2)^(1/2))+arctan((-
b*cos(2*Pi*n4*t)+k)/(b*sin(2*Pi*n4*t)-1)))*r*cos(beta):
> der_x2b:=diff(x2b(t),t):
> der_y2b:=diff(y2b(t),t):
> dx2b:=unapply(der_x2b,t):
> dy2b:=unapply(der_y2b,t):
>
r:=0.142:l:=0.106:k:=0.060:n:=0.286:d:=0.060:b:=0.006:c:=0.100
:x3B:=0.044:y3B:=0:nk:=0.847:n4:=0.9:nt:=0.58443:beta:=13*Pi/1
80:

```

Vykreslování grafu

```

> prohluben:= circle([0,0], 0.045, color=black):
> R_kotouce:= circle([0,0], 0.195, color=black):
> trajektorie:=plot([x2b(t),y2b(t),t=0..90.94527259]):
> primka:= line([0,0], [x2b(0),y2b(0)], color=black,
linestyle=1):
> display(prohluben,R_kotouce,trajektorie,primka):

```

Příloha č. 4 - Ukázka použitého programu pro výpočet trajektorie obecného bodu kotouče v prostoru tmelky v softwarovém prostředí Maple

```

> restart:with(linalg):with(plots):with(plottools):
> T12:=matrix(3,3,[[cos(kappa(t)), -
sin(kappa(t)), 0],[sin(kappa(t)), cos(kappa(t)), 0],[0,0,1]]);

$$T12 := \begin{bmatrix} \cos(\kappa(t)) & -\sin(\kappa(t)) & 0 \\ \sin(\kappa(t)) & \cos(\kappa(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

> T13:=matrix(3,3,[[cos(tau(t)), -
sin(tau(t)), 0],[sin(tau(t)), cos(tau(t)), 0],[0,0,1]]);

$$T13 := \begin{bmatrix} \cos(\tau(t)) & -\sin(\tau(t)) & 0 \\ \sin(\tau(t)) & \cos(\tau(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

> rOB:=vector(3,[xOB,yOB,0]);

$$rOB := [xOB, yOB, 0]$$

> r12:=vector(3,[0,n,0]);

$$r12 := [0, n, 0]$$

> xxst:=t->l-cos(psi(t))*r*sin(beta)+sin(psi(t))*r*cos(beta);

$$xxst := t \rightarrow l - \cos(\psi(t)) r \sin(\beta) + \sin(\psi(t)) r \cos(\beta)$$

> yyt:=t->k-n+sin(psi(t))*r*sin(beta)+cos(psi(t))*r*cos(beta);

$$yyt := t \rightarrow k - n + \sin(\psi(t)) r \sin(\beta) + \cos(\psi(t)) r \cos(\beta)$$

> r2st:=vector(3,[xxst(t),yyt(t),0]);

$$r2st := [l - \cos(\psi(t)) r \sin(\beta) + \sin(\psi(t)) r \cos(\beta), \\ k - n + \sin(\psi(t)) r \sin(\beta) + \cos(\psi(t)) r \cos(\beta), 0]$$

> r2stx:=unapply(r2st[1],t);

$$r2stx := t \rightarrow l - \cos(\psi(t)) r \sin(\beta) + \sin(\psi(t)) r \cos(\beta)$$

> r2sty:=unapply(r2st[2],t);

$$r2sty := t \rightarrow k - n + \sin(\psi(t)) r \sin(\beta) + \cos(\psi(t)) r \cos(\beta)$$

> rk:=vector(3,[xk,yk,0]);

$$rk := [xk, yk, 0]$$

> rk2:=evalm(T12&*rk);

$$rk2 := [\cos(\kappa(t)) xk - \sin(\kappa(t)) yk, \sin(\kappa(t)) xk + \cos(\kappa(t)) yk, 0]$$

> rk2x:=unapply(rk2[1],t):
> rk2y:=unapply(rk2[2],t):
> rk3:=evalm(rk2-r2st-T13&*rOB);

$$rk3 := [\cos(\kappa(t)) xk - \sin(\kappa(t)) yk - l + \cos(\psi(t)) r \sin(\beta) - \sin(\psi(t)) r \cos(\beta) \\ - \cos(\tau(t)) xOB + \sin(\tau(t)) yOB, \sin(\kappa(t)) xk + \cos(\kappa(t)) yk - k + n \\ - \sin(\psi(t)) r \sin(\beta) - \cos(\psi(t)) r \cos(\beta) - \sin(\tau(t)) xOB - \cos(\tau(t)) yOB, 0]$$

> rk3x:=unapply(rk3[1],t):
> rk3y:=unapply(rk3[2],t):

```

```

> psi:=t->arcsin((c^2-l^2-d^2-k^2-
b^2+2*b*sin(phi(t))*l+2*b*cos(phi(t))*k)/(-
sqrt((2*b*d*cos(phi(t))-2*d*k)^2+(2*b*d*sin(phi(t))-
2*d*l)^2))-arctan((2*b*cos(phi(t))*d-2*k*d)/(-
2*l*d+2*b*sin(phi(t))*d)):
> phi:=t->2*Pi*n4*t:
> tau:=t->2*Pi*nt*t:
> kappa:=t->2*Pi*nk*t:
>
r:=0.142:1:=0.106:k:=0.060:n:=0.286:d:=0.060:b:=0.006:c:=0.100
:x3B:=0.044:y3B:=0:nk:=0.847:n4:=0.9:nt:=0.58443:beta:=13*Pi/1
80:xk:=0.150:xOB:=0.044:yk:=0.020:yOB:=0:
> norma_r2st:=norm(r2st,2):
> abs_r2st:=unapply(norma_r2st,t):
> norma_rk3:=norm(rk3,2):
> abs_rk3:=unapply(norma_rk3,t):
> prvni_prusecik:=fsolve(abs_rk3(t)=0.035,t=0.96..0.965):
> druhy_prusecik:=fsolve(abs_rk3(t)=0.035,t=0.965..0.975):
>
interval_prvni:=plot([t,abs_rk3(t),t=prvni_prusecik..druhy_pru
secik]):
>
brouseni:=plot([rk2x(t),rk2y(t),t=prvni_prusecik..druhy_prusec
ik],color=green, linestyle=1,thickness=2):
> stred_tmelky:=plot([r2stx(t),r2sty(t),t=0..0.8],color=black,
linestyle=1,thickness=2):
> R1:= circle([0,0], 0.045, color=black):
> R2:= circle([0,0], 0.195, color=black):
> display(interval_prvni):
> display(stred_tmelky,brouseni,R1,R2,scaling=constrained):

```



```

> restart:with(linalg):with(plots):with(plottools):
> T12:=matrix(3,3,[[cos(kappa(t)), -
sin(kappa(t)), 0],[sin(kappa(t)), cos(kappa(t)), 0],[0,0,1]]);

$$T12 := \begin{bmatrix} \cos(\kappa(t)) & -\sin(\kappa(t)) & 0 \\ \sin(\kappa(t)) & \cos(\kappa(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

> T12T:=transpose(T12);

$$T12T := \begin{bmatrix} \cos(\kappa(t)) & \sin(\kappa(t)) & 0 \\ -\sin(\kappa(t)) & \cos(\kappa(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

> T13:=matrix(3,3,[[cos(tau(t)), -
sin(tau(t)), 0],[sin(tau(t)), cos(tau(t)), 0],[0,0,1]]);

$$T13 := \begin{bmatrix} \cos(\tau(t)) & -\sin(\tau(t)) & 0 \\ \sin(\tau(t)) & \cos(\tau(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

> T16:=matrix(3,3,[[cos(-psi(t)), -sin(-psi(t)), 0],[sin(-
psi(t)), cos(-psi(t)), 0],[0,0,1]]);

$$T16 := \begin{bmatrix} \cos(\psi(t)) & \sin(\psi(t)) & 0 \\ -\sin(\psi(t)) & \cos(\psi(t)) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

> dT12:=map(diff,T12,t);

$$dT12 := \begin{bmatrix} -\sin(\kappa(t))\left(\frac{d}{dt}\kappa(t)\right) & -\cos(\kappa(t))\left(\frac{d}{dt}\kappa(t)\right) & 0 \\ \cos(\kappa(t))\left(\frac{d}{dt}\kappa(t)\right) & -\sin(\kappa(t))\left(\frac{d}{dt}\kappa(t)\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

> dT13:=map(diff,T13,t);

$$dT13 := \begin{bmatrix} -\sin(\tau(t))\left(\frac{d}{dt}\tau(t)\right) & -\cos(\tau(t))\left(\frac{d}{dt}\tau(t)\right) & 0 \\ \cos(\tau(t))\left(\frac{d}{dt}\tau(t)\right) & -\sin(\tau(t))\left(\frac{d}{dt}\tau(t)\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

> dT16:=map(diff,T16,t);

$$dT16 := \begin{bmatrix} -\sin(\psi(t))\left(\frac{d}{dt}\psi(t)\right) & \cos(\psi(t))\left(\frac{d}{dt}\psi(t)\right) & 0 \\ -\cos(\psi(t))\left(\frac{d}{dt}\psi(t)\right) & -\sin(\psi(t))\left(\frac{d}{dt}\psi(t)\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

> r16:=vector(3,[1,k,0]):
> r63:=vector(3,[-r*sin(beta), r*cos(beta), 0]):
> r3B:=vector(3,[x3B,y3B,0]):

```

```

> r12:=vector(3,[0,n,0]):
r1B:=evalm(r16+T16&*r63+T13&*r3B):
r2B:=evalm(T12T&*(r16+T16&*r63+T13&*r3B-r12));
r2B := [cos(kappa(t))
        (l - cos(psi(t)) r sin(beta) + sin(psi(t)) r cos(beta) + cos(tau(t)) x3B - sin(tau(t)) y3B) +
        sin(kappa(t))
        (k + sin(psi(t)) r sin(beta) + cos(psi(t)) r cos(beta) + sin(tau(t)) x3B + cos(tau(t)) y3B - n), -
        sin(kappa(t))
        (l - cos(psi(t)) r sin(beta) + sin(psi(t)) r cos(beta) + cos(tau(t)) x3B - sin(tau(t)) y3B) +
        cos(kappa(t))
        (k + sin(psi(t)) r sin(beta) + cos(psi(t)) r cos(beta) + sin(tau(t)) x3B + cos(tau(t)) y3B - n), 0
    ]

> psi:=t->arcsin((c^2-l^2-d^2-k^2-
b^2+2*b*sin(phi(t))*l+2*b*cos(phi(t))*k)/(-
sqrt((2*b*d*cos(phi(t))-2*d*k)^2+(2*b*d*sin(phi(t))-
2*d*l)^2))-arctan((2*b*cos(phi(t))*d-2*k*d)/(-
2*l*d+2*b*sin(phi(t))*d));
psi := t -> arcsin\left(-\frac{c^2-l^2-d^2-k^2-2 b \sin(\phi(t)) l+2 b \cos(\phi(t)) k}{\sqrt{(2 b d \cos(\phi(t))-2 d k)^2+(2 b d \sin(\phi(t))-2 d l)^2}}\right)
- \arctan\left(\frac{2 b d \cos(\phi(t))-2 d k}{2 b d \sin(\phi(t))-2 d l}\right)

> phi:=t->2*Pi*n4*t;
phi := t -> 2 \pi n_4 t

> tau:=t->2*Pi*nt*t;
tau := t -> 2 \pi n t

> kappa:=t->2*Pi*nk*t;
kappa := t -> 2 \pi n k t

> v1B3:=evalm(dT16&*r63+dT13&*r3B):
> v1B2:=evalm(dT12&*r2B):
> v23:=evalm(v1B3-v1B2):
> v23_2:=v23[2]:
> eee:=norm(v23,2):
> v23x:=unapply(v23[1],t):
> v23y:=unapply(v23[2],t):
> abs_v23:=unapply(eee,t):
> r:=0.142:l:=0.106:k:=0.060:n:=0.286:d:=0.060:b:=0.006:c:=0.100
:x3B:=0.044:y3B:=0:nk:=0.847:n4:=0.9:nt:=0.58443:beta:=13*Pi/1
80:
> v_x:=plot([t,v23x(t),t=0..10],color=blue,legend=["x-ová
složka relativní rychlosti]):
> v_y:=plot([t,v23y(t),t=0..10],color=green,legend=["y-ová
složka relativní rychlosti]):
> v_abs:=plot([t,abs_v23(t),t=0..10],legend=["velikost
relativní rychlosti]):
> display(v_abs,labels=["t[s]","v[m*s^-1]"]):

```

# Příloha č. 6 - Zrnitost brusiva karbidu boru

26-SEP-2006 15:02

ESK CERAMICS GMBH U CO KG

+49 831 5618495

S.01



Sympatec GmbH  
System-Partikel-Technik

HELOS (H0176) & SUCCELL2

23.03.2006 10:12:07,3580

B4C F 600

Charge

603M200/9

Meßbedingung

Standard nass

Ultraschall

-Dauer

30,00 s

-Pause

15,00 s

Meßbereich

R3: 0.5/0.9...175µm

Meßdauer

9,93 s

Referenzmessung

23.03 10:10:58, 0,00 %

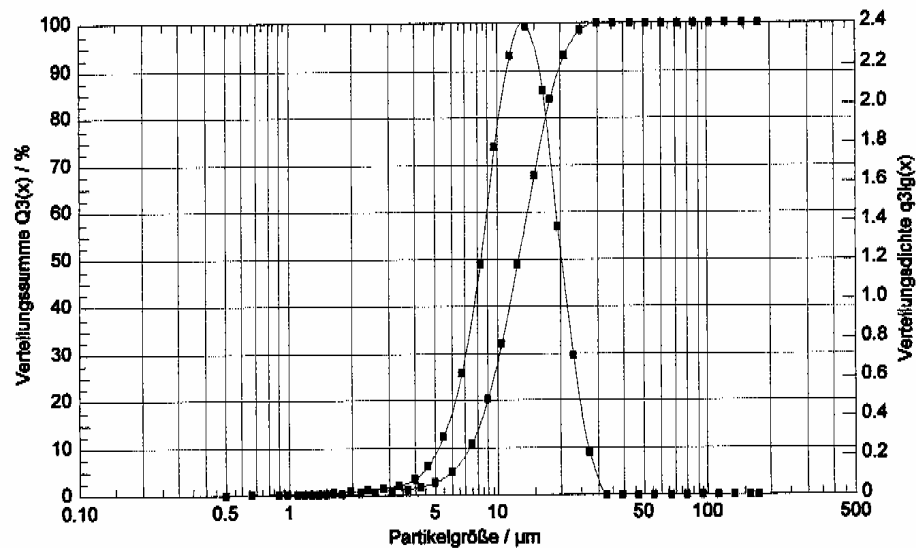
Auswertung

LD (4.2.2.0)

Bediener

Bü

Kommentar



## Volumenverteilung

$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$	$x_0/\mu\text{m}$	$Q_3/\%$
0,90	0,00	3,70	1,06	15,00	67,65	61,00	100,00
1,10	0,00	4,30	1,56	18,00	83,91	73,00	100,00
1,30	0,03	5,00	2,48	21,00	93,01	87,00	100,00
1,50	0,08	6,00	4,79	25,00	98,34	103,00	100,00
1,80	0,16	7,50	10,74	30,00	100,00	123,00	100,00
2,20	0,31	9,00	20,00	36,00	100,00	147,00	100,00
2,60	0,48	10,50	31,84	43,00	100,00	175,00	100,00
3,10	0,72	12,50	48,77	51,00	100,00		
$x_3 =$	24,00 µm	$x_{90} =$	12,66 µm	$x_{94} =$	6,31 µm		
$x_0 =$	30,00 µm	$x_{10} =$	20,01 µm	$x_{90} =$	9,00 µm		
				$C_{opt} =$	14,78 %		

## Příloha č. 7 - Ukázka programu v Delphi

Použité knihovny:

Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes,  
Graphics, Controls, Forms, Dialogs, Menus, StdCtrls, ExtCtrls,  
Dateutils, -knihovna pro práci s časem  
SPort; -knihovna pro přístup k sériovému portu

Tato procedura hledá sériové COM porty v počítači a přidává je do seznamu

```
procedure TH1Form.SouborClick(Sender: TObject);
var i:Integer;
    item:TMenuItem;
    PortName:string;
begin
    SouborPort.Clear;

    for i:=1 to 256 do
        if(IsPortAvailable(i)) then begin
            item:=TMenuItem.Create(SouborPort);
            PortName:=Format('COM%d',[i]);
            item.Caption:=PortName;
            item.Tag:=i;
            item.OnClick:=VyberPortu;
            SouborPort.Add(item);
        end;
    end;
```

V případě, že hlavní procedura, která celou dobu běhu programu neustále kontroluje stav vstupů, zjistí na vstupu změnu, hned k ní přiřadí hodnotu systémového času a všechny údaje zapíše do souboru data.txt.

```
procedure TH1Form.Aktivace(Sender: TObject);
var
    c,x:TTime;
    l,d:integer;
    r:real;
    s:string;
begin
    if(Port<>nil) then begin
        cbCTS.Checked:=Port.CTS;
        cbDSR.Checked:=Port.DSR;
        cbRLSD.Checked:=Port.RLSD;
        cbRING.Checked:=Port.RING;
    end;
    if g then begin
```

```

assignfile(f,'c:\data.txt');
append(f);
port.DTR:=true;
if not cbdsr.Checked then
begin
c:=time*1000;
c:=c-x;
end;
if cbdsr.Checked then x:=time*1000;
if not cbrlsd.checked then writeln(f,' ',c:0:15);

label3.Caption:=timetostr(c);
label2.Caption:=timetostr(x);
s:=timetostr(c);

if c>0 then begin  writeln(f,c:0:15);           // ošetření zákmitů, které vznikají při sepnutí
                                                    kontaktu

end;
closefile(f);
end;

end;

```